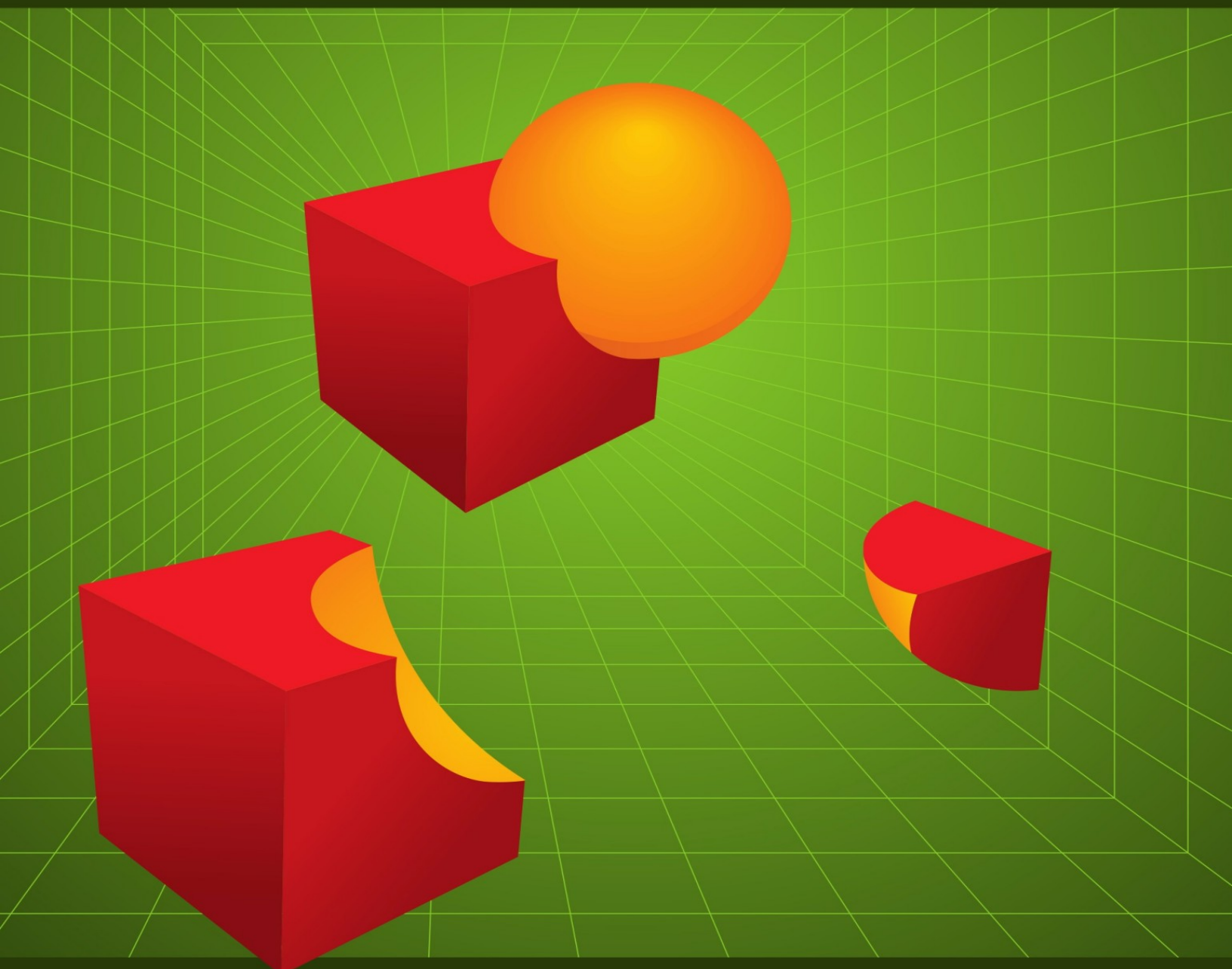
Maciej Sydor

Wprowadzenie do CAD

Podstawy komputerowo wspomaganego projektowania



WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN

MACIEJ SYDOR

WPROWADZENIE DO CAD

PODSTAWY KOMPUTEROWO WSPOMAGANEGO PROJEKTOWANIA

WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN
WARSZAWA 2009

Projekt okładki: Łukasz Kowalik
Redakcja: Matylda Pawłowska

Zastrzeżonych nazw firm i produktów użyto w książce wyłącznie w celu identyfikacji.

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2009

eBook został przygotowany na podstawie wydania papierowego z 2009 r., (wyd. I)
Warszawa 2019

ISBN 978-83-01-20451-8

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Skład wersji elektronicznej na zlecenie Wydawnictwa Naukowego PWN:
mobisfera.pl

Spis treści

Od autora

Słownik ważniejszych terminów CAx

Wstęp

1. Elementy teorii projektowania
1.1. Projektowanie techniczne
1.2. Obiekt projektowania
1.3. Uwagi o celowości technicznej wytworów
1.4. Uwagi o zapisie konstrukcji
1.4.1. Pryncypia zapisu konstrukcji
1.4.2. Rodzaje zapisu konstrukcji
1.4.3. Zasady odwzorowywania obiektów
1.4.4. Dokumentacja płaska CAD – wybrane wymagania
1.5. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 1.

2. Komputerowo wspomagane projektowanie – CAD
2.1. Wprowadzenie
2.2. Zakres CAD
2.3. Rys historyczny CAD
2.4. Zarządzanie i archiwizacja dokumentacji CAD
2.5. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 2.

3. Podstawy modelowania cyfrowego
3.1. Dane przetwarzane przez systemy CAD
3.2. Układy współrzędnych
3.3. Warstwy
3.4. Krzywe parametryczne
3.5. Rodzaje modeli cyfrowych stosowanych w CAD
3.5.1. Klasyfikacja modeli cyfrowych
3.5.2. Modele krawędziowe

3.5.3. Modele powierzchniowe
3.5.4. Modele z prymitywów objętościowych (CSG)
3.5.5. Modele bryłowe B-rep
3.5.6. Modele oparte na cechach konstrukcyjnych (FBM)
3.6. Wykorzystanie technik KBE w modelowaniu cyfrowym
3.7. Wybrane techniki modelowania cyfrowego
3.8. Przekształcanie rysunków 2D w modele 3D
3.9. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 3.

4. Więzy i parametryzacja
4.1. Więzy
4.2. Parametryzacja
4.3. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 4.

5. Ważniejsze systemy CAD
5.1. Charakterystyka wybranych systemów CAD
5.2. Kernele modelowania geometrycznego
5.3. Wymagania sprzętowe systemów CAD
5.4. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 5.

6. Uwagi o wymianie danych
6.1. O potrzebie wymiany danych
6.2. Wybrane problemy związane z wymianą danych
6.3. Techniki wymiany danych
6.4. Formaty uniwersalne IGES i STEP
6.4.1. IGES
6.4.2. STEP
6.5. Komercyjne formaty wymiany danych
6.6. Integracja CAD z CAM
6.7. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 6.

7. Obliczenia wytrzymałościowe wspomagane komputerem
7.1. O obliczeniach wytrzymałościowych
7.2. Zastosowanie metody elementów skończonych
7.3. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 7.

8. Podstawy renderingu
8.1. Cel renderingu
8.2. Podstawowe algorytmy renderingu
8.3. Tekstury powierzchni i związane z nimi opcje dodatkowe
8.4. Parametry oświetlenia
8.5. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 8.

9. Spis ważniejszych formatów plików wykorzystywanych w programach CAD

10. Przydatne linki

11. Dodatek – przykładowe zestawy pytań sprawdzających

12. Spis tabel i ilustracji

13. Literatura

Od autora

Podręcznik zawiera podstawowe zagadnienia z zakresu komputerowo wspomaganego projektowania (CAD). Szczególny nacisk położono na zastosowanie technik komputerowych do projektowania szeroko rozumianych urządzeń mechanicznych. Podręcznik przeznaczony jest dla studentów wyższych uczelni technicznych, zwłaszcza dla kierunków związanych z inżynierią produkcji. Główne cele książki to m.in.:

- wprowadzenie w elementarne zagadnienia teorii projektowania technicznego w aspekcie CAD,
- przedstawienie stosowanych w CAD metod modelowania cyfrowego – poznanie teoretycznych podstaw niezbędnych do efektywnego opanowania techniki sporządzania komputerowego zapisu konstrukcji,
- klasyfikacja i charakterystyka oprogramowania CAD,
- wprowadzenie do zagadnień związanych z obliczeniami wytrzymałościowymi wspomaganymi komputerowo oraz przygotowywaniem multimedialnych prezentacji wyrobów.

Tematykę podręcznika dobrano w sposób obejmujący w syntetycznej postaci możliwie szeroki zakres komputerowo wspomaganego projektowania. Jest w pełni zrozumiałe, że tak rozległej i szybko rozwijającej się dziedziny wiedzy inżynierskiej nie można podsumować w pełni w jednym podręczniku, dlatego tę publikację należy traktować jako wprowadzające krótkie kompendium wiedzy, a bardziej szczegółowych informacji należy poszukiwać w Internecie, prasie branżowej, dokumentacji dołączanej do oprogramowania oraz podręcznikach użytkowania poszczególnych programów CAD.

Bardzo cenne będą wszelkie uwagi krytyczne Czytelników, które pozwolą na aktualizację i ulepszenie treści w kolejnych wydaniach

podręcznika.

Maciej Sydor
(sydor@up.poznan.pl)

Poznań, styczeń 2009

Słownik ważniejszych terminów CAx

2,5D – dwuwymiarowa grafika wykonana metodą →FBM.

2D (od ang. *two-dimensional* – dwuwymiarowy) – rodzaj grafiki komputerowej wykorzystywanej do przedstawiania obiektów trójwymiarowych na płaszczyźnie (w rzutach).

3D (od ang. *three-dimensional*) – trójwymiarowy – przedstawianie obiektów rzeczywistych za pomocą trójwymiarowych →modeli cyfrowych.

ACIS – rodzaj →*kernela* (opis tutaj).

Algorytm – zbiór jasno zdefiniowanych czynności koniecznych do wykonania pewnego zadania w skończonej liczbie kroków.

APS (Advanced Planning System) – zaawansowany system informatyczny wspomagający logistykę w przedsiębiorstwie wytwórczym.

ASCII (American Standard Code for Information Interchange) – 7-bitowy kod przyporządkowujący literom alfabetu angielskiego, cyfrom, znakom przestankowym i innym symbolom oraz poleceniom sterującym liczby z zakresu 0 – 127; rozróżniane są duże i małe litery (np. litera „A" jest kodowana liczbą 65, natomiast „a" – liczbą 97).

Asocjatywność – sprzężenie informacyjne pomiędzy plikami →CAD (np. plikami rysunku a plikiem części, plikiem złożenia a plikami poszczególnych części). Każda edycja wykonana w jednym z asocjatywnych plików jest automatycznie realizowana w drugim. Asocjatywnie są powiązane ze sobą poszczególne moduły w pakietach →CAx (np. model →3D z dokumentacją rysunkową lub z plikiem →CAM). Asocjatywność może być jednokierunkowa lub dwukierunkowa.

AutoLISP – wewnętrzny język programowania, odmiana języka Lisp, która jest dołączana do AutoCAD. Ma na celu umożliwić użytkownikowi przystosowanie programu do jego specyficznych potrzeb przez rozszerzenie funkcji ponad standardowe (np. o automatyzację wstawiania bloków rysunkowych).

Automatic Feature Recognition (AFR) – algorytmy identyfikujące cechy konstrukcyjne wyższego poziomu, tzw. technologiczne (np. otwory, rowki, podcięcia), na podstawie zbioru cech niższego poziomu, takich jak elementarne powierzchnie, krawędzie itp. Celem AFR jest automatyzacja procesu projektowego.

BOM (Bill Of Materials) – lista materiałów konieczna do wyprodukowania zaprojektowanego obiektu technicznego. Istnieje kilka odmian BOM: *Engineering BOM* nie zawiera materiałów technologicznych, *Manufacturing BOM* zawiera dodatkowo listę narzędzi i materiałów, *Sales BOM* zawiera informację o opakowaniach itp., *Service BOM* zawiera listę części zamiennych.

B-rep (Boundary representation, BREP) – metoda modelowania objętościowego polegająca na zdefiniowaniu powierzchni granicznych obejmujących zamknięty obszar (vide podpunkt 3.5.5).

CAA (Computer Aided Asembly) – komputerowo wspomagany montaż.

CACE (Computer Aided Cost Evaluation) – systemy wariantowania kosztów i optymalizacji.

CAD (Computer Aided Design) – projektowanie wspomagane komputerem – metoda projektowania technicznego z wykorzystaniem komputera i specjalistycznego oprogramowania jako głównych narzędzi (patrz. rozdział 2).

CADD (Computer Aided Design and Drafting) – projektowanie i kreślenie wspomagane komputerowo (wykonywanie dokumentacji rysunkowej).

CAE (Computer Aided Engineering) – inżynieria wspomagana komputerowo – wykorzystanie komputera w typowych czynnościach inżyniera, zwłaszcza podczas przeprowadzania obliczeń wytrzymałościowych (→FEM, →CFD).

CAID (Computer Aided Industrial Design) – wizualizacja produktu wspomagana komputerowo. Pewnego rodzaju podsystem →CAD, którego celem jest umożliwienie tworzenia wizualizacji produktów dla osób niebędących inżynierami. Modele CAID w odróżnieniu od modeli CAD: (1) są zawsze fotorealistyczne, (2) mają uproszczoną strukturę ukazującą zasadę działania wyrobu o złożonej strukturze, (3) są zorientowane na przedstawienie całego wyrobu (samochodu, samolotu, okrętu) z pominięciem drobnych części.

CAM (Computer Aided Manufacturing) – komputerowe wspomaganie wytwarzania – sterowanie obrabiarek, robotów, linii montażowych.

CAMD (Computer Aided Materials Design) – projektowanie materiałów wspomagane komputerowo.

CAMS (Computer Aided Materials Selection) – dobór materiałów wspomagany komputerowo.

CAP (Computer Aided Planning) – komputerowo wspomagane planowanie.

CAPP (Computer Aided Process Planning) – komputerowo wspomagane planowanie procesów.

CAQ (Computer Aided Quality Control) – komputerowo wspomagane pomiar i sterowanie jakością.

Case-based reasoning (CBR) – (wnioskowanie na podstawie przypadków) metodologia (stosowana m.in. w konstruowaniu), której cechą charakterystyczną jest wykorzystywanie poprzednich rozwiązań do generowania nowych postaci konstrukcyjnych. Wcześniejsze rozwiązania są przechowywane w bazie danych wiedzy pozyskanej z analizy przypadków (ang. *Case Studies*).

CAx – zbiorczy termin oznaczający kilkanaście dziedzin zastosowania komputera do wspomagania prac inżynierskich (m.in. →CAA, →CAD, →CADD, →CAE, →CAM, →CAP, →CAPP, →CAQ).

CFD (Computational Fluid Dynamics) – numeryczna mechanika płynów.

CIM (Computer Integrated Manufacturing) – komputerowo zintegrowane wytwarzanie). Podsystem →PLM.

CNC (Computerized Numerical Control) – komputerowe sterowanie numeryczne. Termin zwykle używany w kontekście sterowania cyfrowego obrabiarek (takich jak frezarki czy tokarki) zdolnych czytać standardowy kod sterujący →G-code. CNC może dotyczyć sterowania maszyn pomiarowych oraz robotów przemysłowych.

CSG (Constructive Solid Geometry) – geometria oparta na prymitywach objętościowych (solidach) i podstawowych operacjach na nich wykonywanych (suma, różnica, część wspólna) (vide podpunkt 3.5.4).

Digital MockUp (DMU) – cyfrowa makieta produktu umożliwiająca jego analizę przed fizycznym wytworzeniem prototypu. Cele wykonania DMU to: redukcja czasu projektowania, redukcja kosztów przygotowania produkcji oraz optymalizacja funkcjonalności.

Drzewo strukturalne modelu (drzewo konstrukcji lub drzewo topologiczne) – forma graficznej prezentacji struktury modelu CSG i B-rep oraz wykonanego metodą FBM (vide podpunkt 3.5.6).

DTP (Desktop Publishing) – komputerowe przygotowywanie tekstów i ilustracji do druku, również przygotowywanie dokumentów do publikacji w postaci elektronicznej.

EDM (Enterprise Document Management lub Engineering Document Management) – zarządzanie dokumentacją w przedsiębiorstwie.

FBD (Feature Based Design) →FBM.

FBM (Feature Based Modeling) modelowanie oparte na cechach konstrukcyjnych – jedna z metod modelowania cyfrowego (vide podpunkt 3.5.6).

FEM (Finite Element Method lub FEA – Finite Element Analysis) – metoda elementów skończonych lub metoda elementu skończonego (MES). Metoda obliczeń inżynierskich (m.in. rozkładu naprężeń, przemieszczeń, przepływu ciepła, przepływu cieczy). Istotą metody jest podział (tzw. dyskretyzacja) powierzchni lub przestrzeni na elementy o skończonych wymiarach i przeprowadzanie obliczeń tylko dla węzłów każdego elementu. Poza węzłami wyznaczana właściwość jest przybliżana (szerszy opis w podpunkcie 7.2).

FMS (Flexible Manufacturing System) – elastyczny system wytwarzania.

Fraktal (łac. *fractus* – złamany, cząstkowy) – składnik modelu fraktalnego; fraktal w pewnym uproszczeniu oznacza obiekt samopodobny, czyli taki, który składa się z elementów będących miniaturą całości (elementy oglądane w powiększeniu mają takie same proporcje wymiarowe jak całość, którą tworzą).

FT&A (Functional Tolerancing and Annotation) – metoda geometrycznego wymiarowania i tolerancji stosowana m.in. w plikach CATIA.

G-code – język programowania urządzeń →CNC, w USA obowiązuje standard EIA RS274D, w Europie ISO 6983-1:1982.

GD&T (lub GDT) (Geometric Dimensioning and Tolerancing) – rodzaj języka symbolicznego używanego w →CAD służącego do zapisu danych geometrycznych oraz wartości dopuszczalnych odchyłek.

Grafika rastrowa – reprezentacja obrazu za pomocą →rastra. Zapamiętywane są kolor i lokalizacja każdego piksela.

Grafika wektorowa (grafika obiektowa) – reprezentacja złożonego obiektu 2D lub 3D za pomocą formuł matematycznych i parametrów opisujących geometrię, topologię i inne atrybuty poszczególnych obiektów składowych (por. →wektoryzacja).

KBE (Knowledge Based Engineering) dziedzina działalności inżynierskiej będąca połączeniem CAD oraz baz wiedzy (vide podpunkt 3.6).

Kernel (ang. *kernel*) – tzw. jądro graficzne, podstawowa część programu CAx zawierająca procedury tworzące, modyfikujące i przetwarzające dane geometryczne (o podstawowych kernelach →CAD napisano w podpunkcie 5.2).

Linia odniesienia – linia ciągła cienka poprowadzona od zarysu, krawędzi, linii oznaczającej powierzchnię, powierzchni lub linii wymiarowej, przeznaczona do umieszczania napisów lub oznaczeń.

Linia symetrii (ang. *line of symmetry*) – linia wyobrażalna dzieląca przedmiot na połowy.

Linia środkowa (ang. *centreline*) – linia przechodząca przez środki powierzchni obrotowych przedstawianego przedmiotu.

Linia wymiarowa – linia umieszczona równolegle do wymiarowanego odcinka prostoliniowego lub współśrodkowo z łukiem, lub promieniowo, lub jako łuk okręgu zatoczony z wierzchołka kąta.

MCAD (Mechanical Computer Aided Design) – zastosowanie technik →CAD w projektowaniu urządzeń mechanicznych.

MES →FEM.

Model cyfrowy (model CAD) – plik (lub pliki) danych →CAD zorganizowane zgodnie z rzeczywistymi cechami odwzorowywanych przedmiotów. Modele cyfrowe najczęściej są trójwymiarowe (dwuwymiarowe w pierwszych programach CAD), zawierają dane geometryczne, topologiczne i inne (por. →rysunek CAD). Model cyfrowy produktu (cyfrowa makieta produktu, tzw. Digital MockUp – DMU) umożliwia projektantowi przeprowadzenie analiz i symulacji, zanim powstanie prototyp fizyczny.

MRP (Material Requirements Planning) – planowanie zapotrzebowania materiałowego w procesie produkcji.

Natywny format pliku – standard zapisu informacji specyficzny dla konkretnego programu CAD.

NURBS (nonuniform rational B-spline) – niejednorodny wymierny B-splajn – rodzaj krzywej sklejanej typu splajn (czasami termin NURBS jest stosowany do nazwania powierzchni powstałych przez przesunięcie (swept) krzywej NURBS). Specyficzną cechą krzywej (i powierzchni) NURBS, decydującą o jej szerokim zastosowaniu w CAx, jest to, że każdy punkt kontrolny krzywej (lub biegun siatki kontrolnej powierzchni) wpływa na kształt obiektu NURBS tylko lokalnie.

ObjectARX (AutoCAD Runtime Extension) – wewnętrzny język programowania umożliwiający definiowanie własnych poleceń i obiektów graficznych ściśle zintegrowanych z „oryginalnym" interfejsem AutoCAD.

OEM (Original Equipment Manufacturer) – oryginalny producent sprzętu – firma sprzedająca produkt innej firmie zobowiązanej

m.in. do zapewnienia obsługi technicznej produktu.

Oś symetrii →linia symetrii.

Parametr – w CAD charakterystyczny wymiar modelu cyfrowego obiektu rzeczywistego, do którego przypisany jest ciąg wartości.

Parametryzacja – zastąpienie wymiarów geometrycznych modelu →parametrami (vide podpunkt 4.2).

Parasolid – rodzaj →*kernela* (opis tutaj).

PDM (Product Data Management) – zarządzanie informacjami o produkcie. Systemy typu PDM integrują przepływ elektronicznej dokumentacji technicznej w przedsiębiorstwie (np. Smarteam lub Windchill PDMLink).

PLC (Programmable Logic Controller) – programowalny sterownik logiczny służący do automatyzacji procesów (ustawienia wyjść sterownika dobierane są przez program na podstawie wartości na wejściach).

PLM (Product Lifecycle Management) – zarządzanie cyklem życia produktu jest systemowym (kompleksowym) podejściem do organizacji wytwarzania bazującym na wykorzystaniu zintegrowanego ze sobą oprogramowania komputerowego wspomagającego wszystkie procesy związane z wytworzeniem i obsługą produktu – od fazy koncepcji, przez projektowanie szczegółowe, prototypy, testy, produkcję, serwis, aż po wycofanie produktu z rynku. Wybrane ważniejsze aplikacje PLM zawiera tabela 12.

Ploter (ang. *plotter*) – urządzenie peryferyjne służące do nanoszenia wielkoformatowej grafiki wektorowej (w szerszym znaczeniu również urządzenie do wycinania, grawerowania itp.).

Plotowanie – wydruk na →ploterze.

PMI (Product and Manufacturing Information) – dane technologiczne produktu, czyli informacje dołączane do pliku CAD; informacje o wymiarach nominalnych i tolerancjach, adnotacje tekstowe (komentarze), informacje o wykończeniu powierzchni, specyfikacje materiałowe (zapisane w języku GD&T lub FT&A), warianty produktu, specyfikacje zmian konstrukcyjnych, stosowane klasyfikatory geometryczne, technologiczne, dokumentacji konstrukcyjnej i dokumentów zakładowych oraz

elementy procesów wytwórczych. PMI jest przedmiotem normy amerykańskiej ASME Y14.41 *Product Data Definition* oraz międzynarodowej ISO 1101 *Representation of specifications in the form of a 3D model.*

Podziałka (ang. *scale*) – stosunek liczbowy wielkości liniowych przedstawionych na rysunku do odpowiednich rzeczywistych wielkości liniowych. Podziałka powiększająca jest większa od jedności; zmniejszająca – mniejsza, a naturalna równa jedności (por. →skala).

Pomocnicza linia wymiarowa – linia ograniczająca odległość elementów podlegających wymiarowaniu.

PPC (Production Planning and Control) – planowanie i sterowanie produkcją – planowanie, przygotowywanie i sterowanie procesami wytwórczymi w zakresie realizacji poszczególnych zleceń produkcyjnych, a w szczególności terminów ich realizacji, zaopatrzenia materiałowego, obciążenia stanowisk i gniazd wytwórczych oraz aktywnej kontroli produkcji w toku.

Raster – siatka utworzona przez ortogonalne pionowo-poziome linie dzielące obraz na piksele; symulacja obrazu wielotonalnego za pomocą dużej liczby różnokolorowych (jednotonalnych) pikseli. Zdjęcie z aparatu cyfrowego jest zapisywane w formie rastra.

Rasteryzacja – konwersja grafiki wektorowej na rastrową.

Rysunek CAD – model CAD (lub jego część) przedstawiony na papierze lub plik przeznaczony do plotowania bądź wydruku (por. →model CAD).

Skala (ang. *graphic scale*) – podziałka wyrażona graficznie, której długość odcinka odpowiada rzeczywistej długości wyrażonej liczbowo (por. →podziałka).

Tabliczka rysunkowa – miejsce na arkuszu rysunkowym lub dokumencie tekstowym przeznaczone do umieszczenia informacji identyfikujących wyrób, rysunek, wykonawców itp.

TDM (Technical Data Management lub Technical Document Management) – zarządzanie informacjami technicznymi lub zarządzanie dokumentacją techniczną.

Topologia – sposób powiązania obiektów geometrycznych, czyli ich orientacja oraz warunki brzegowe, na przykład zgodność

wierzchołków lub styczność płatów powierzchni wzdłuż krawędzi.

Warstwa – zbiór danych w →modelu CAD (opis w podpunkcie 3.3).

Wektoryzacja – (trasowanie) konwersja grafiki rastrowej na grafikę wektorową. Piksele bitmapy zostają zgrupowane i przekonwertowane na obiekty wektorowe na zasadzie podobieństwa koloru. Proces wektoryzacji niemal każdej bitmapy zniekształca jej pierwotny wygląd. Programami umożliwiającymi wektoryzację są m.in. CorelTrace (składnik pakietu CorelDRAW), Adobe Flash, Adobe Illustrator, Adobe FreeHand oraz darmowy Inkscape.

Więzy – ograniczenia i warunki przypisane obiektom cyfrowym; więzy geometryczne (więzy postaciowe i wymiarowe) determinują wymiary i formę geometryczną obiektów, więzy kinematyczne są ograniczeniami liczby stopni swobody obiektów oraz parametrów ich ruchu (czasów, trajektorii, prędkości i przyspieszeń). Więzy geometryczne opisano w podpunkcie „Więzy geometryczne – postaciowe i wymiarowe” tutaj, natomiast więzy kinematyczne w podpunkcie „Modelowanie zespołów – więzy kinematyczne” tutaj.

Wirtualne prototypowanie – proces tworzenia oraz analiz cyfrowego modelu geometrycznego produktu pod względem wytrzymałościowym (→CAE), funkcjonalnym i ergonomicznym. W zakres analiz może wchodzić np. montaż, funkcjonowanie – ocena wariantów konstrukcyjnych pod względem designu lub kosztu wykonania oraz obliczenia wytrzymałościowe →FEM.

Woksel (ang. *voxel* – złożenie słów *volumetric element*) – w grafice trójwymiarowej najmniejszy rozróżnialny element przestrzeni, odpowiednik piksela w grafice dwuwymiarowej (patrz przypis nr 34).

Wymiar – wartość liczbowa wyrażona w określonych jednostkach miary i przedstawiona graficznie na rysunkach technicznych za pomocą linii, symboli i znaków.

Wymiar funkcjonalny – wymiar, który ma bezpośredni wpływ na współdziałanie części w zespole lub wyrobie. Tego typu wymiary w →parametrycznych programach →CAD można edytować w celu zmiany wymiarów modelu cyfrowego.

Wymiar pomocniczy (zależny informacyjny, sterowany, orientacyjny) – w parametrycznym programie →CAD są to wymiary, których nie można edytować w celu zmiany geometri modelu cyfrowego. Ich wartość wynika z innych wymiarów modelu, a podawane są jedynie w celach orientacyjnych (np. jako wymiar wypadkowy przyjęty w otwartym łańcuchu wymiarowym, którego liczba wymiarowa, umieszczana zwykle w nawiasach okrągłych, nie jest brana pod uwagę w produkcji i kontroli wyrobów gotowych).

Wymiar uzupełniający – wymiar, który nie ma bezpośredniego wpływu na współdziałanie części w zespole. Podobnie jak wymiary funkcjonalne, tego typu wymiary można edytować w celu zmiany wymiarów modelu części.

Wymiarowanie – podawanie wymiarów rysunkowych na widokach, przekrojach i kładach.

Wstęp

Żyjemy w otoczeniu wytworów szybko zmieniającej się cywilizacji technicznej. Przejawem tych zmian jest coraz lepsza zdolność do produkowania coraz to doskonalszych narzędzi służących zaspokajaniu potrzeb człowieka. Rozwój cywilizacyjny jest warunkowany jakością asocjatywnego połączenia trzech czynników: człowieka, jego wytworów oraz uporządkowanej informacji. W czasach współczesnych jesteśmy świadkami ogromnego rozwoju techniki, czyli wiedzy na temat praktycznego wykorzystania osiągnięć nauki w przemyśle, budownictwie, transporcie, medycynie itp. Doskonalenie sposobów usprawnionych nauką ludzkich działań przejawia się zastępowaniem dotychczas stosowanych wyrobów przez produkty lepsze i tańsze. Europejska rewolucja naukowa zapoczątkowana w czasach oświecenia (przełom XVI i XVII wieku) była wywołana znaczącym usprawnieniem przepływu informacji, jakie nastąpiło po pojawieniu się druku. Trwający kilka wieków intensywny rozwój naukowo-techniczny doprowadził: do rewolucji przemysłowej, a następnie do rewolucji informatycznej w XX wieku. Ta ostatnia wywołana rozwojem mikroelektroniki, podstawowego narzędzia usprawniającego procesy gromadzenia, przetwarzania i przechowywania informacji, zaowocowała obserwowanym współcześnie gwałtownym skokiem cywilizacyjnym.

W ostatnim ćwierćwieczu XX wieku rzeczywisty koszt jednostki mocy elektronicznej techniki obliczeniowej[1] obniżył się ponad 10 000 razy [Gawrysiak 2003]. Według strony internetowej www.top500.org zawierającej ranking najszybszych superkomputerów w listopadzie 2008 roku najszybszym superkomputerem na świecie była maszyna Roadrunner o wydajności 1,105 Pflopów/s ($1{,}105\times10^{15}$ flopów na sekundę). Dla porównania typowy komputer osobisty z procesorem Pentium 4 (2 GHz) ma wydajność rzędu 3×10^{9} flopów/s, a typowy kalkulator ok.

10 flopów/s. Moc mózgu człowieka w zakresie operacji zmiennoprzecinkowych (np. w zakresie dzielenia dużych liczb) można mierzyć w miliflopach/s, jednak potencjalna całkowita moc obliczeniowa mózgu typowego człowieka (posiadającego przeciętnie 10^{18} neuronów ze 100×10^{18} połączeniami) to według http://computer.howstuffworks.com 10×10^{24} operacji na sekundę (nie są to operacje zmiennoprzecinkowe).

Zgodnie z prawem Moore'a[2] od połowy lat siedemdziesiątych XX wieku moc obliczeniowa mikroprocesorów (w tym procesorów komputerowych) podwaja się co 18 – 24 miesięcy[3], spada też ich cena. Ogromna liczba mikroprocesorów nie znajduje zastosowania w komputerach, ale w innych urządzeniach, takich jak telefony, obrabiarki, samochody itp. Maszyny i urządzenia przemysłowe dzięki sensorom mogą się dopasowywać do zmieniających się warunków otoczenia, podejmować decyzje i w zakresie ograniczonego zbioru gotowych wzorców zachowań wykonywać działanie. Człowiek uwolniony od czasochłonnych i nużących czynności kontrolera może podjąć się zadań twórczych, wyznaczając cele w dużym stopniu autonomicznemu przemysłowemu systemowi technicznemu, w skład którego wchodzą komputery, oprogramowanie oraz sterowane numerycznie obrabiarki, urządzenia transportowe, pomiarowe itp.

Klasyczny przemysłowy podział na technologów i konstruktorów sprawiał, że projektowane obiekty powstawały w relatywnie długim czasie oraz nie zawsze w zadowalającym stopniu spełniały wszystkie wymagania użytkowe (stopień spełnienia wymagań klientów) oraz technologiczne (obróbki, montażu, pakowania i transportu). Bezpośrednim skutkiem zaimplementowania technik komputerowych jest pojawienie się idei tzw. zintegrowanego wytwarzania CIM (Computer Integrated Manufacturing). Jednym z ważniejszych podsystemów CIM jest komputerowo wspomagane projektowanie CAD (Computer Aided Design) będące tematem podręcznika. Istotą CAD jest modelowanie cyfrowe, czyli tworzenie wyidealizowanej i uproszczonej, ale użytecznej repliki obiektu przeznaczonego do produkcji. Głównym zastosowaniem takiej repliki jest reprezentacja kluczowych informacji konstrukcyjnych, tzw. zapis

konstrukcji. CAD pozwala na swobodne i mało kosztowne eksperymentowanie w świecie wirtualnym.

Techniki komputerowe można zastosować na każdym etapie cyklu życia wyrobu. Stosunkowo w najmniejszym stopniu na etapie opracowywania koncepcji, ale już w bardzo dużym stopniu na etapach konstruowania, wytwarzania, serwisowania i zarządzania utylizacją. Zastosowanie technik komputerowych integrujących szeroko pojęte wytwarzanie wyrobów (CIM) zmienia współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne, a celem tych zmian jest:

- obniżenie kosztów produkcji zarówno w fazach jej przygotowania, jak i realizacji, które można osiągnąć przez optymalizację i struktury przepływu informacji w przedsiębiorstwie;
- optymalizacja zarządzania realizacją zleceń produkcyjnych dzięki krótkim cyklom produkcyjnym, krótkim terminom realizacji zleceń produkcyjnych, minimalnym zapasom materiałowym oraz ze względu na wysoki stopień wykorzystania potencjału produkcyjnego.

Można zaryzykować stwierdzenie, że w obecnych czasach jesteśmy świadkami powstania nowej kultury technicznej, w której na bezprecedensową skalę możliwości człowieka są kompensowane i wspomagane przez sprzęt i oprogramowanie komputerowe.

1. Elementy teorii projektowania

1.1. Projektowanie techniczne

Projektowanie jest procesem prowadzącym do opracowywania projektu, czyli (1) planu działania, (2) wstępnej wersji czegoś lub (3) dokumentu zawierającego wyczerpujący opis sposobu wykonania jakiegoś artefaktu (obiektu lub urządzenia). Przedmiotem książki jest komputerowe wspomaganie *projektowania technicznego*. Projektowanie techniczne według Tarnowskiego [Tarnowski 1997] jest **całokształtem działań zmierzających do możliwie jednoznacznego określenia obiektu projektowania służącego do zaspokajania zidentyfikowanej potrzeby**. Rezultatem projektowania jest informacja (dokumentacja techniczna, czyli zapis konstrukcji) wystarczająca do fizycznej realizacji obiektu projektowania[4].

Istnieje wiele definicji projektowania technicznego dostępnych w literaturze naukowej. Wiele z nich zebrał Gasparski [Gasparski 1988]; projektowanie to:

- „[…] podejmowanie decyzji w warunkach niepewności i przy wysokiej karze za błąd" (Asimow),
- „[…] celowo ukierunkowane działanie polegające na rozwiązywaniu problemów" (Archer),
- „[…] symulowanie tego, co pragniemy wykonać, przed wykonaniem tego właśnie dokonywane tylekroć, ilekroć jest to potrzebne do nabrania zaufania do wyniku końcowego" (Booker),
- „[…] wykorzystanie zasad naukowych, informacji technicznej oraz wyobraźni do sformułowania struktury mechanicznej, maszyny lub systemu spełniającego przepisane funkcje najtaniej i najefektywniej" (Fielden),
- „[…] przeskok wyobraźni od współczesnych faktów do przyszłych możliwości" (Page),
- „[…] znajdowanie właściwych fizycznych składników struktur materialnych",
- „[…] kolejne czynności, począwszy od zidentyfikowania problemu, a skończywszy na opracowaniu rozwiązania zadowalającego pod względem funkcjonalnym, ekonomicznym itd.",
- „[…] iteracyjny proces decyzyjny zmierzający do sformułowania planów, według których zasoby są przekształcane w systemy lub urządzenia zaspakajające potrzeby człowieka".

Inne dostępne w literaturze definicje projektowania:

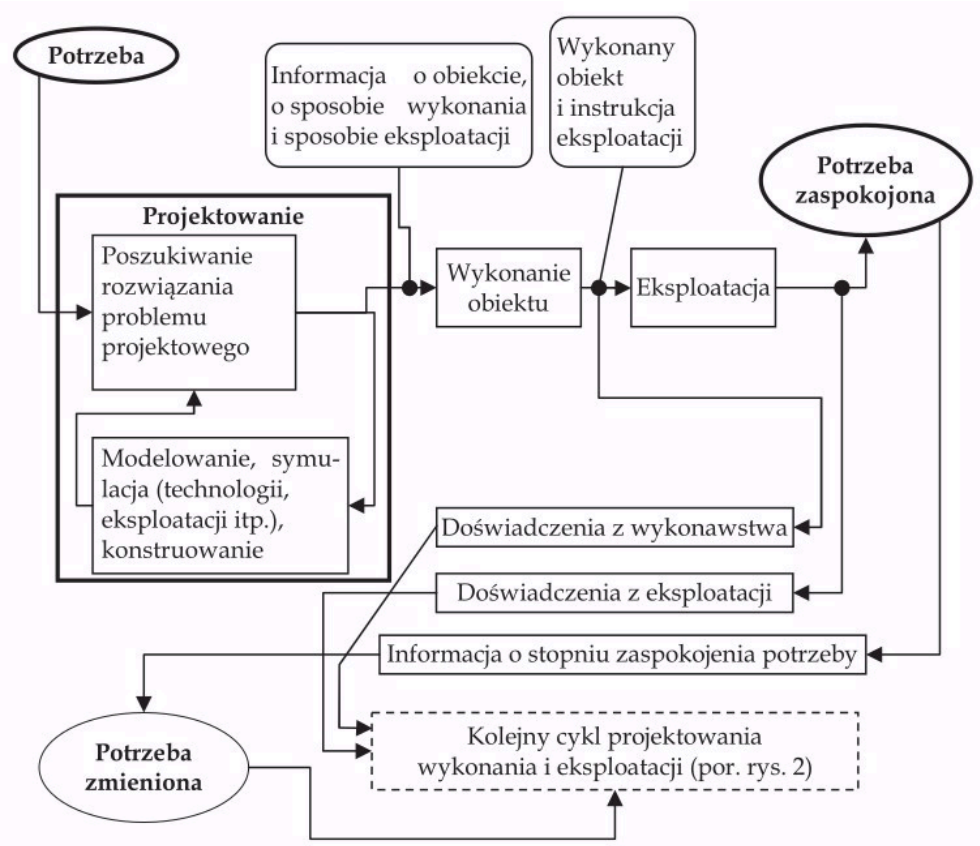
- „[…] realizacja bardzo złożonego aktu wiary" [Jones 1977],
- „[…] tworzenie nowych obiektów technicznych" [Dietrich 1995],
- „[…] działanie twórcze – powołanie do istnienia czegoś nowego i użytecznego, czegoś, co poprzednio nie istniało" (Reswick).

- „[…] proces, który prowadzi działalność ludzką od stanu początkowego (problem do rozwiązania – potrzeba do zaspokojenia) do stanu końcowego, którym jest pożądany wynik (system = wyrób, obiekt, organizacja, proces, program komputerowy)” [Patzak 1982].

Ostatnią definicję, której autorem jest współtwórca systemowej teorii techniki profesor Patzak, można uznać za najbardziej ogólną definicję projektowania technicznego. Dotyczy ona projektowania różnego rodzaju systemów (technicznego, socjotechnicznego, socjoekologicznego).

Według Tarnowskiego [Tarnowski 1997] charakterystyczne dla procesu projektowania technicznego są następujące cechy:

1. Projektowanie jest procesem przetwarzania i generowania informacji.
2. Celem procesu projektowania jest obmyślanie tego, czego jeszcze nie było; stąd wynika konieczność stosowania metod heurystycznych lub innych działań twórczych oraz konieczność programowania i symulowania.
3. Projektowanie jest procesem złożonym zawierającym działania o różnym stopniu sformalizowania: od czysto heurystycznych do czysto algorytmicznych, przy czym działania twórcze są kluczowe. Rezultaty silnie zależą od człowieka.
4. Proces projektowania jest podporządkowany procesowi zaspokajania potrzeb.
5. Mimo znacznego udziału elementów twórczych proces projektowania może być badany, opisywany i powinien być nauczany.
6. Brak jednoznacznych modeli samego procesu projektowania.
7. Informacja wejściowa projektowania jest niepełna.
8. Najczęściej brak pełnego matematycznego modelu projektowanego obiektu i procesów z nim związanych, co powoduje, że proces projektowania można algorytmizować tylko częściowo.
9. Ekonomiczne i pozaekonomiczne skutki złych rezultatów projektowania mogą spowodować wielkie straty (finansowe, socjalne i inne).



Rysunek 1. Cykl życia wyrobu: a) klasyczny, b) zintegrowany

W ujęciu systemowym (holistycznym) proces projektowania jest częścią systemu projektowania składającego się z: (1) podmiotu projektowania (człowieka), (2) obiektu projektowania i (3) procesu projektowania. Proces projektowania w aspekcie procesu zaspokajania ściśle określonej potrzeby przedstawia rysunek 1.

Projektowanie jest częścią cyklu życia wyrobu. Techniki CAD umożliwiają bardzo wydatne skrócenie cyklu życia wyrobu przez integrację etapów koncypowania, konstruowania i przygotowania technologii (rys. 2b). Duże systemy oprogramowania inżynierskiego CAD/CAM/CAE/PLM[5], przeznaczone do pełnej komputeryzacji procesu opracowywania i produkowania wyrobu, umożliwiają dodatkowo integrację projektowania, przygotowania produkcji oraz produkcji. Dotychczasowe czasochłonne czynności sekwencyjne, takie jak przedstawione na rysunku 2a: koncypowanie, konstruowanie i przygotowanie technologii z zadań krytycznych[6], stały się zadaniami niekrytycznymi, a dodatkowo czas realizacji każdego z tych zadań uległ wydatnemu skróceniu.

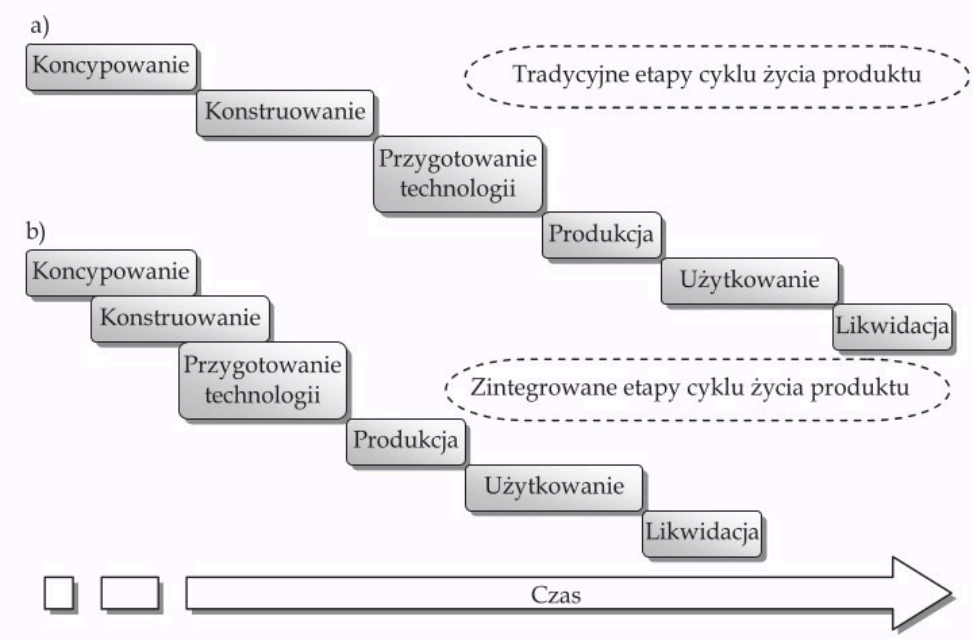
Projekt techniczny składa się m.in. z zapisanych cech geometrycznych (zdefiniowanych w przestrzeni), przypisanego materiału oraz opisu relacji dynamicznych między podzespołami. Cechy geometryczne stanowią osnowę do definiowania cech materiałowych i dynamicznych.

Należy odróżnić projektowanie od konstruowania (konstruowanie jest jednym z etapów projektowania). Proces projektowania technicznego można podzielić na dwa

zasadnicze etapy:

(1) koncypowanie:

- rozpoznanie potrzeby,
- poszukiwanie rozwiązania,



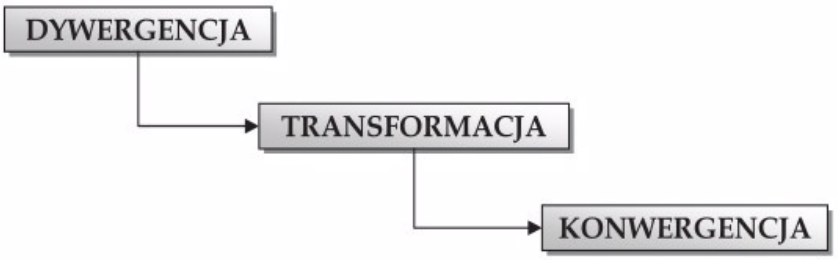
Rysunek 2. Cykl życia wyrobu: a) klasyczny, b) zintegrowany

(2) konstruowanie:

- kształtowanie struktury (zwłaszcza geometrycznej),
- sporządzanie dokumentacji.

Poszukiwanie rozwiązań problemu projektowego (koncypowanie) – najważniejszy etap procesu projektowania, jest typowym procesem twórczym. Według Branowskiego [Branowski 1999] miernikiem zdolności koncepcyjnej projektanta może być liczba proponowanych przez niego rozwiązań w określonym czasie. Ta liczba jest zależna od pięciu czynników: (1) nastawienia psychicznego twórcy, (2) posiadanego i dostępnego zasobu wiedzy, (3) włożonego wysiłku, (4) zastosowanej metody postępowania, (5) uzdolnień osobistych. Cztery pierwsze czynniki można kształtować, piąty jest twórczym darem wrodzonym.

Najprostszą strukturę całego procesu projektowania przedstawia rysunek 3 obejmujący trzy podstawowe fazy: dywergencję (rozbiór, analizę problemu), transformację (zmianę elementów i relacji wraz z prognozą ich działania) oraz konwergencję (syntezę i ocenę nowego rozwiązania) [Jones 1977].



Rysunek 3. Proces projektowania [Jones 1977]

Branowski wyróżnia dwa odmienne schematy postępowania w trakcie projektowania technicznego: diagnostyczny i prognostyczny. Najczęściej stosowane w projektowaniu podejście diagnostyczne polega na postępowaniu według następującego wzorca:

analiza → synteza → ocena.

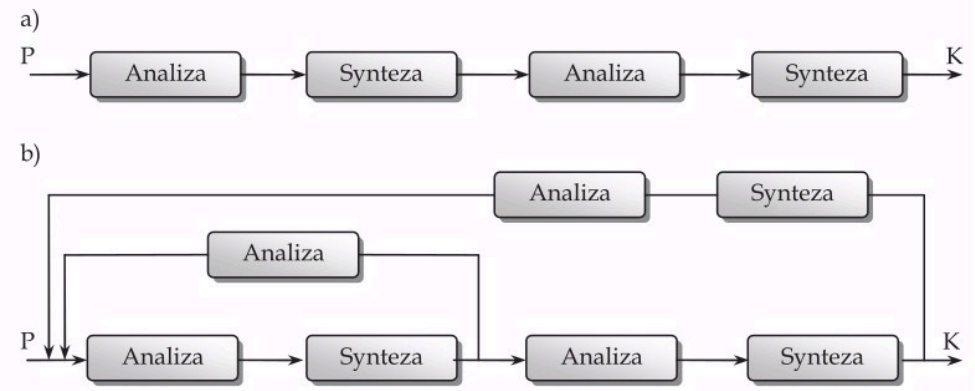
Nowe rozwiązanie powstaje w tym schemacie jako usprawnienie, modyfikacja istniejących w otoczeniu wzorców, rozwiązań wcześniej stosowanych.

Zupełnie odmiennym podejściem jest projektowanie prognostyczne, które odbywa się według następującego wzorca postępowania:

synteza → ocena → analiza.

Takie podejście zapewnia oderwanie się od istniejących wzorców, eliminację związanych z tym błędów i tworzenie nowego jakościowo rozwiązania.

W praktyce bardzo często stosuje się podejścia pośrednie, zawierające elementy projektowania diagnostycznego i prognostycznego. Poszczególne etapy procesu (analiza i synteza) przeprowadzania projektu ze stanu początkowego P do stanu końcowego K mogą następować po sobie w porządku sekwencyjnym (rys. 4a) lub sekwencyjno-iteracyjnym (rys. 4b) [Dietrych 1974].

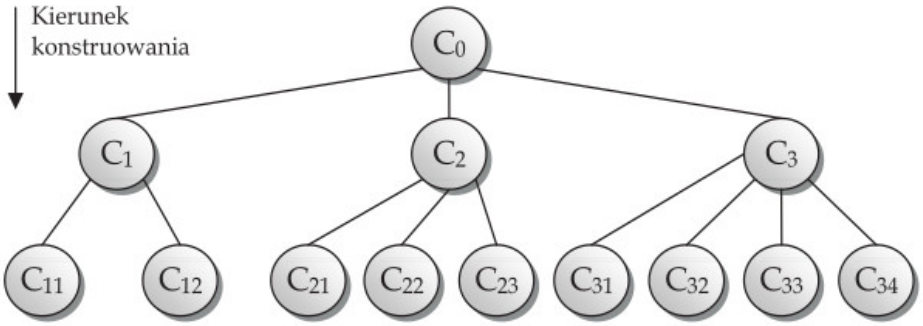


Rysunek 4. Układy elementarnych zabiegów procesu (na podstawie [Dietrych 1974]): a) cykl sekwencyjny, b) cykl sekwencyjno-iteracyjny

Cykle iteracyjne w procesie sekwencyjno-iteracyjnym wynikają z konieczności uzyskania najlepszego z możliwych rozwiązania konstrukcyjnego, co odbywa się w następujących po sobie krokach tworzących zamkniętą pętlę.

Projektowanie techniczne polega na doborze cech konstrukcyjnych. Cechy (lub właściwości) konstrukcyjne są „minimalnym zbiorem zmiennych określających […] relacje obiektu do jego otoczenia" [Tarnowski 1997]. Cechy konstrukcyjne (C_g i C_m) środka technicznego ujmują zatem jego charakterystyki użytkowe, instalacyjne, ekonomiczne itp. Na wejściu lub wyjściu środka technicznego mogą znajdować się: energia E, masa m lub informacja I – w dowolnych kombinacjach. Środkiem technicznym może być urządzenie techniczne (np. maszyna, mebel, budynek) lub złożony układ materialny (system) utworzony z wielu urządzeń i pomieszczeń realizujących sterowalne procesy techniczne, których celem jest zaspokojenie określonych potrzeb ludzkich (np. zakład produkcyjny).

Konstrukcja jest wyznaczona wtedy, kiedy zostaną określone jej właściwości konstrukcyjne (geometryczne, materiałowe i dynamiczne). Proces konstruowania składa się zazwyczaj z wielu etapów. Według Dietrycha [Dietrych 1974] konstruowanie to proces polegający na przechodzeniu **od ogółu do szczegółu**, na stopniowym doborze poszczególnych właściwości konstrukcyjnych, w wyniku którego następuje coraz większe uszczegółowienie konstrukcji. Hierarchiczność procesu projektowania została przedstawiona na rysunku 5.



Rysunek 5. Kolejność doboru cech konstrukcyjnych (na podstawie [Rydzanicz 1995])

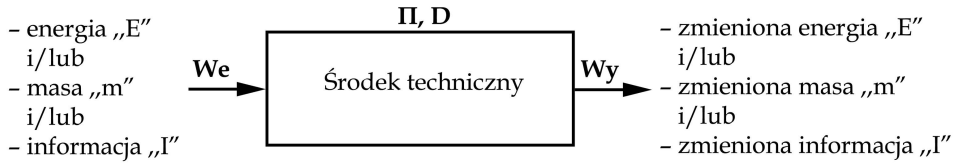
Pierwszym krokiem jest określenie podstawowych cech konstrukcyjnych pierwszego poziomu (C_0), następnie drugiego (C_{1-3}) oraz trzeciego (C_{11-34}). **Technika komputerowa sprawia, że proces projektowania może przebiegać komplementarnie w dwóch kierunkach**. Klasycznie od ogółu do szczegółu (ang. *top-down analysis*), tzn. od pojęcia do przekroju, od małego do dużego, od długoterminowego do krótkoterminowego ujęcia, od strategii (polityki) do taktyki, od ideału do realizowalnego konkretu. Projektowanie może również przebiegać odwrotnie, od szczegółu do ogółu (ang. *bottom-up analysis*). Ten ostatni kierunek jest szczególnie przydatny podczas poprawiania własności zaprojektowanego systemu przez modyfikację jego elementów. Istotę technik CAD stanowi umożliwienie poruszania się w obu kierunkach (w zależności od potrzeby), co zwiększa prawdopodobieństwo zaprojektowania optymalnego wyrobu. W praktyce obiekt zaprojektowany w porządku *top-down* może być ulepszany sposobem *bottom-up.*

Typowy, wspomagany komputerowo, proces projektowania nowego obiektu może przebiegać następująco:

- uzgodnienie w zespole projektowym ogólnej koncepcji produktu (ewentualnie sporządzenie odręcznego szkicu); możliwe jest także zeskanowanie trójwymiarowej makiety wyrobu wykonanej przez artystę,
- wykonanie modelu głównego elementu projektowanego wyrobu (najczęściej jest to element o największych gabarytach: rama, korpus, obudowa itp.),
- wykonanie złożenia – uzupełnienie głównego elementu o znormalizowane części z bibliotek (np. łożyska, złącza itp.); modelowanie brakujących części,
- przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych wybranych elementów, analiza poprawności funkcjonowania, dobór materiałów na poszczególne podzespoły oraz ocena strony wizualnej, ergonomii; na tym etapie złożenie może zostać przedstawione w formie prezentacji multimedialnej (np. w formacie JT, WAF, DXF lub AVI) lub może zostać wykonany model 3D technikami *rapid prototyping* (szybkie prototypowanie),
- wykonanie prototypu,
- wykonanie wymaganej dokumentacji wymaganej przepisami prawa (np. instrukcji użytkowania, analizy ryzyka, sprawozdania z badań itp.),
- dokonanie ewentualnych poprawek i zmian w projekcie, oszacowanie kosztów wykonania,
- sporządzenie BOM (ang. *Bill of Materials*),
- wykonanie rysunków poszczególnych części lub opracowanie instrukcji dla obrabiarek CNC,
- wykonanie instrukcji montażu (w tym przygotowanie widoków eksplodujących, tzw. exploided view),
- wykonanie ostatecznej prezentacji multimedialnej produktu do celów marketingowych.

1.2. Obiekt projektowania

Obiekt projektowania technicznego (artefakt) to realnie działające urządzenie przeznaczone do zaspokajania określonej potrzeby lub potrzeb, wytworzone przez człowieka [Branowski 1999]. Najbardziej ogólnym, powszechnie stosowanym w literaturze [np. Rydzanicz 1995, Ropohl 2004, Branowski 2007], sposobem opisu obiektów technicznych jest przedstawienie schematyczne z użyciem czterech pojęć: wejście **We**, wyjście **Wy**, postać konstrukcyjna **Π** i działanie **D** (rys. 6).



Rysunek 6. Model środka technicznego (artefaktu)

Działanie **D** środka technicznego o konstrukcji **Π** polega na przekształceniu wejścia **We** w wyjście **Wy**. Celem projektowania jest wytworzenie zapisu konstrukcji; konstrukcja jako utwór jest abstrakcją – środek techniczny jako wytwór jest konkretem.

Jak wspomniano wcześniej, wyznaczona konstrukcja musi mieć skonkretyzowane cechy konstrukcyjne $\boldsymbol{C}_k$:

$$C_k = \{C_g , C_m , T\}$$

gdzie:

C_g – geometryczne cechy konstrukcyjne,

C_m – materiałowe cechy konstrukcyjne,

T – technologia wytworzenia (obróbka i montaż).

Jeden z ważniejszych rodzajów środków technicznych stanowi maszyna. Maszyna to każdy obiekt materialny zaadaptowany lub przetworzony przez człowieka służący do zaspokajania jego potrzeb drogą przekształcania energii lub informacji[7] [Sydor 2008] – jednym z wejść maszyny jest więc zawsze energia. W tabeli 1 podano wejścia i wyjścia kilku typowych maszyn, informacje zaczerpnięto z prac Dietrycha.

Tabela 1. Ogólna charakterystyka wejść i wyjść wybranych maszyn (za [Dietrych 1968 i 1974])

Wejście	**Maszyna**	**Wyjście**
Półprodukt, energia, informacja	Obrabiarka	Produkt
Cukierki, papier, energia	Maszyna do pakowania	Opakowane cukierki
Para wodna	Turbogenerator	Para wodna o niniejszej entalpii i skropliny, energia elektryczna
Paliwo, powietrze, materiały eksploatacyjne	Silnik spalinowy	Moc (moment siły i prędkość obrotowa), spaliny, energia cieplna, energia akustyczna
Paliwo, powietrze, materiały eksploatacyjne, informacja (kierowca)	Pojazd	Moment siły, prędkość, spaliny, energia cieplna, energia akustyczna
Fale elektromagnetyczne, energia elektryczna	Telewizor	Obraz, dźwięk, ciepło
Informacja wejściowa, energia elektryczna	Komputer	Informacja wyjściowa

Specyficznego rodzaju obiektem projektowania jest system socjotechniczny, którego projektowanie należy do dziedziny ergonomii – interdyscyplinarnej dyscypliny wiedzy.

1.3. Uwagi o celowości technicznej wytworów

„Projektowanie techniczne jest procesem podejmowania decyzji przy wysokiej karze za błąd" (definicja projektowania według Morrisa Asimowa z 1962 roku przytoczona tutaj). Posługując się analogią ze statystyki matematycznej, błędy projektowe można podzielić na cztery grupy:

- błąd pierwszego rodzaju (błąd odrzucenia lub alfa-błąd) polega na uznaniu za błędne rozwiązania, które w rzeczywistości jest najlepsze z możliwych;
- błąd drugiego rodzaju (błąd przyjęcia, beta-błąd) popełnia się, przyjmując niewłaściwy wariant rozwiązania;
- błąd trzeciego rodzaju[8] polega na poprawnym rozwiązaniu niewłaściwego problemu;
- błąd czwartego rodzaju ma miejsce w przypadku, gdy do rozwiązania poprawnie sformułowanego problemu użyje się niewłaściwego narzędzia[9].

Pojęcia racji istnienia wytworu oraz głównych zasad konstruowania zostały sformułowane przez Dietrycha [Dietrych 1985], który wyróżnia:

- rację techniczną (związaną z możliwością zaspokojenia potrzeby),
- rację ekonomiczną (stosunek korzyści uzyskanej przez zaspokojenie potrzeby do poniesionych nakładów),
- rację technologiczną (związaną z możliwościami wytworzenia).

Wyrób, którego dotyczą wymienione racje, spełnia **trzy fundamentalne wymagania dla poprawnego wyrobu**: jest potrzebny, opłacalny i możliwy do wytworzenia.

Główne zasady konstruowania według Dietrycha [Dietrych 1985] to:

- (1) zasada optymalnego stanu obciążenia,
- (2) zasada optymalnego tworzywa,
- (3) zasada optymalnych stosunków wielkości związanych.

Zasadę optymalnego obciążenia (1) można zdekomponować na trzy składowe: (1.1) naprężenia mechaniczne w poszczególnych elementach konstrukcji nie mogą przekraczać pewnych wartości uznanych za dopuszczalne i podanych w normach (**warunek wytrzymałości**), (1.2) odkształcenia poszczególnych elementów oraz konstrukcji jako całości nie mogą przekraczać przyjętych wartości dopuszczalnych (**warunek sztywności**), (1.3) obciążenia nie mogą przekraczać wartości, po których przekroczeniu konstrukcja traci równowagę stałą (**warunek stateczności**).

Zasada optymalnego tworzywa (2) wymaga, aby dobrać materiał najlepszy z możliwych z punktu widzenia kilku wybranych arbitralnie przez konstruktora spośród kilkudziesięciu jego właściwości konstrukcyjnych[10] (np. obrabialności, kosztu, wytrzymałości, trwałości itp.).

Przy doborze cech konstrukcyjnych mogą wystąpić dwa odmienne przypadki, gdy brane są pod uwagę (1) **kryteria subiektywne** (estetyczne) lub (2) **kryteria obiektywne** (techniczne). Parametry subiektywne mogą się zmieniać pod wpływem mody lub innych zmian koniunkturalnych, należą do nich: estetyka (np. kolor i rodzaj

faktury powierzchni), jakość (rozumiana jako stopień spełnienia wymagań klienta) oraz dostępność. Do kryteriów obiektywnych można zaliczyć niezmienne i mierzalne właściwości fizykomechaniczne, technologiczne, cieplne, elektryczne itp. [Sydor 2008].

Zasada optymalnych stosunków wielkości związanych (3) wskazuje na konieczność optymalizacji związków parametrycznych takich wielkości, jak: geometryczne cechy konstrukcyjne, poszczególne własności wytrzymałościowe tworzyw, cechy dynamiczne, własności kinematyczne itp. [Rydzanicz 1995].

1.4. Uwagi o zapisie konstrukcji

1.4.1. Pryncypia zapisu konstrukcji

Zapis konstrukcji jest rezultatem procesu projektowania; powinien być wystarczająco szczegółowy i mieć wystarczający (świadomie przyjęty) poziom wiarygodności mierzony prawdopodobieństwem tego, że prezentowana konstrukcja (i/lub proces przez nią realizowany) zaspokoi potrzebę w sposób najefektywniejszy. Konstrukcja ma znaczenie operacyjne tylko wtedy, kiedy zostanie sporządzony zapis konstrukcji spełniający trzy fundamentalne postulaty:

- jednoznaczności,
- niesprzeczności,
- zupełności.

Zasada jednoznaczności wymaga, aby na podstawie sporządzonego zapisu konstrukcji (np. układu zwymiarowanych rzutów) można było w sposób powtarzalny wytworzyć zapisany obiekt przestrzenny. Osiąga się to przez stosowanie ogólnie przyjętych zasad i przepisów oraz skończonego zbioru znaków i symboli rysunkowych (znormalizowanego języka ikonicznego). **Zasada niesprzeczności** jest postulatem zachowania wzajemnej zgodności znaczenia zastosowanych symboli rysunkowych i oznaczeń graficznych. **Zasada zupełności** wymaga uwzględnienia w zapisie konstrukcji wszystkich koniecznych i wystarczających informacji o obiekcie.

1.4.2. Rodzaje zapisu konstrukcji

Z punktu widzenia zastosowanego nośnika informacji można wyróżnić cztery główne rodzaje zapisu konstrukcji:

1. Graficzny:

- w formie rysunku technicznego wykonanego z wykorzystaniem zasad rzutowania oraz ogólnie przyjętej znormalizowanej symboliki; szczególnym przypadkiem takiego rysunku jest szkic odręczny,
- w formie fotografii.

2. Heurystyczny (słowny).
3. W formie materialnych modeli płaskich i przestrzennych.
4. Cyfrowy (komputerowy) – wykonany za pomocą oprogramowania CAD może mieć formę:

- pliku lub układu wzajemnie powiązanych plików przedstawiających model 3D obiektu (cyfrowa makieta produktu Digital MockUp – DMU),
- układu rzutów prostokątnych przeznaczonego do wydruku – w postaci wektorowej (na ogół), rastrowej (rzadziej) lub połączonych obu rodzajów grafik,
- pliku z programem NC wykorzystywanym w obrabiarkach sterowanych numerycznie (CNC).

Ze wszystkich rodzajów zapisów konstrukcji szczególnie istotny jest cyfrowy zapis konstrukcji w formie modelu 3D stosowany w CAD (tzw. cyfrowa makieta produktu). We współczesnym oprogramowaniu CAD występują następujące rodzaje plików natywnych[11]: pliki części, pliki złożeń oraz pliki rysunków[12]. Każdy z wymienionych typów ma unikalne rozszerzenie. Najczęściej rozpoczyna się pracę w pliku części, tworząc detal. Kiedy dysponuje się kilkoma detalami, można je zmontować w dokumencie złożenia. Tworzenie pliku rysunku zawierającego dokumentację płaską w formie gotowej do wydruku jest zwykle ostatnim etapem projektowania, można je generować z plików części oraz z plików złożeń. Wszystkie trzy typy plików są ze sobą asocjatywnie[13] powiązane.

Znaczenie trójwymiarowego modelu cyfrowego wynika ze znaczenia zmysłu wzroku w odbieraniu rzeczywistości przez mózg. Przepustowość informacyjna tego najważniejszego z posiadanych przez człowieka systemu postrzegania kilkakrotnie przekracza przepustowość innych zmysłów. Znamienne dla cyfrowego modelowania jest dokonywanie ciągłego zapisu konstrukcji w czasie projektowania. Duża ilość zmagazynowanych w pamięci komputera danych projektowych odciąża pamięć twórcy, ułatwiając wydajniejsze koncypowanie. Model cyfrowy staje się narzędziem sprzężenia zwrotnego pomiędzy twórcą a konstrukcją jako środek unaoczniający to, co zostaje pomyślane. Zapis tego rodzaju umożliwia bezpośrednią ocenę rezultatów danego etapu działań konstruktora, a następnie dokonywania zmian czy ewentualnych poprawek. Cyfrowy model spełnia rolę czynnika heurystycznego, to jest czynnika naprowadzającego na właściwe rozwiązanie danego problemu projektowo-konstrukcyjnego. Nie bez znaczenia jest też możliwość szybkiego przetwarzania danych informacyjnych przez komputer ułatwiająca właściwy dobór postaci konstrukcyjnej projektowanego wytworu z udziałem wielu zapisanych w bazach danych normaliów.

1.4.3. Zasady odwzorowywania obiektów

Grafika inżynierska opiera się na prawach i ustaleniach geometrii euklidesowej. Geometria nie jest jednolitym działem matematyki; składa się z wielu dziedzin, w których specjaliści stosują radykalnie odmienne metody (przykładami mogą być liczne geometrie nieeuklidesowe, w których z zasady nie jest spełniony piąty aksjomat Euklidesa).

Najstarsze znane próby formułowania twierdzeń geometrii pojawiły się w VI wieku p.n.e. w starożytnej Grecji (Tales z Miletu). Historycznie geometria była zbiorem przepisów praktycznych, które dotyczyły wykonywania pomiarów fizycznych przedmiotów materialnych. Kompilacją poznanych do III wieku p.n.e. faktów jest dzieło Euklidesa „Elementy" (ok. 300 r. p.n.e.). Obejmuje teorię proporcji, arytmetykę oraz geometrię. Jest pierwszym dedukcyjnym wykładem geometrii w historii matematyki. System geometrii euklidesowej jest przedmiotem nauki we wszystkich szkołach świata i stanowi podstawę niemal całej praktycznej działalności ludzi. Na geometrii Euklidesa opierają się m.in. mechanika klasyczna (wszystkie jej prawa dotyczą przestrzeni euklidesowej) oraz rysunek techniczny. Wszystkie twierdzenia geometryczne są wyprowadzone zgodnie z tradycyjnymi regułami logiki na podstawie przyjętych pojęć pierwotnych oraz pięciu aksjomatów Euklidesa (o przynależności, o uporządkowaniu, o porównaniu i ciągłości oraz piątego tzw. pewniku Euklidesa).

Geometria wykreślna, której przedmiotem są metody odwzorowań obiektów przestrzennych na płaszczyźnie, jest teoretyczną podstawą sporządzania graficznych zapisów konstrukcji stosowanych w technice. W geometrii wykreślnej pojęcia pierwotne, jak punkty, proste i płaszczyzny, oraz występujące między nimi relacje rozumiane są zgodnie z powszechną intuicją i nabytym doświadczeniem człowieka analizującego proces odwzorowań dwuwymiarowych obiektów trójwymiarowych. W grafice inżynierskiej wykorzystuje się dodatkowo zdefiniowane i opisane w literaturze przedmiotowej tzw. elementy niewłaściwe (punkt, linia i płaszczyzna niewłaściwa):

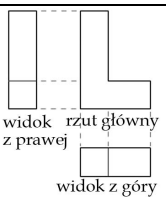
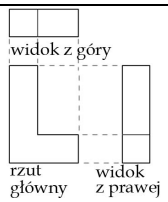
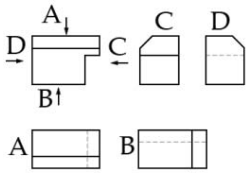
- wszystkie proste równoległe przecinają się w punkcie niewłaściwym,
- wszystkie płaszczyzny równoległe przecinają się wzdłuż krawędzi będącej prostą niewłaściwą,
- płaszczyzna niewłaściwa jest zbiorem punktów niewłaściwych i prostych niewłaściwych, wszystkich punktów i płaszczyzn przestrzeni.

Operacja odwzorowania obiektów trójwymiarowych na płaszczyźnie opiera się na procesie rzutowania. W technice najczęściej stosowanych jest kilka podstawowych metod rzutowania[14]: rzutowanie prostokątne równoległe (tabela 2)[15], rzutowanie aksonometryczne prostokątne izometryczne[16], rzutowanie planometryczne[17] (tabela 3) oraz rzutowanie perspektywiczne środkowe[18] (tabela 4).

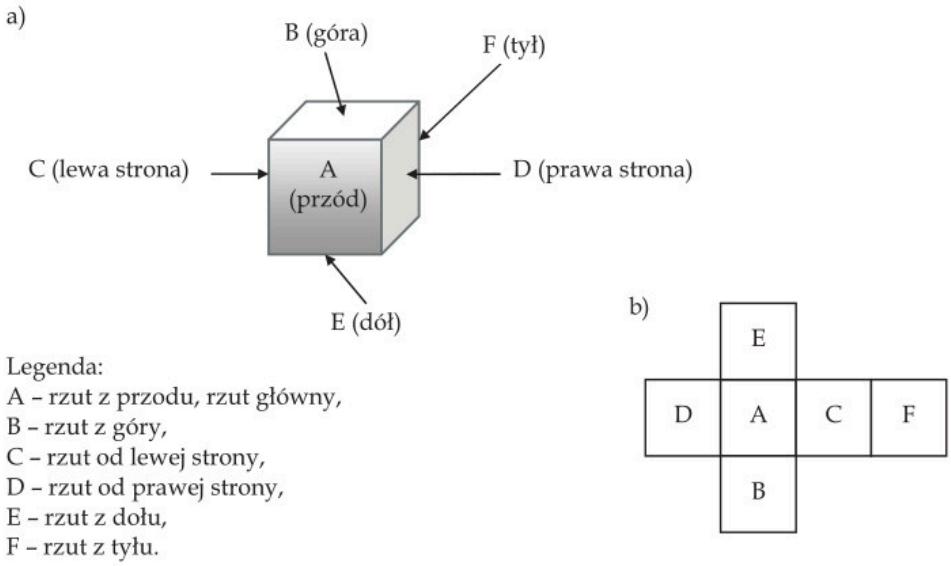
Zastawienie wymienionych metod przedstawiania obiektów na rysunku technicznym przedstawiają tabele 2, 3 i 4. Tabela 2 zawiera stosowane w praktyce inżynierskiej i najczęściej wykorzystywane metody przedstawiania cyfrowych makiet wyrobu na wydrukach – rzutowanie prostokątne. W rzutowaniu prostokątnym środek rzutowania położony jest w nieskończoności (linie rzutowania są równoległe).

Tabela 2. Rzutowanie prostokątne równoległe

Położenie płaszczyzny rzutu	**Położenie głównego zarysu przedmiotu**	**Metoda przedstawiania na płaszczyźnie**	**Przykład**

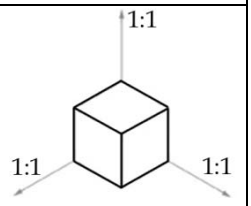
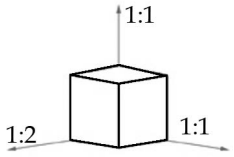
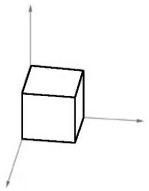
Równoległe/prostopadłe do osi współrzędnych i prostopadłe do linii rzutowania	Zwykle równoległe/prostopadłe do płaszczyzny rzutu i płaszczyzn współrzędnych	Rzutowanie według metody pierwszego kąta (metoda europejska	
		Rzutowanie według metody trzeciego kąta (metoda amerykańska)	
		Rzutowanie identyfikowane strzałkami	
	Nie ma głównego zarysu	Rzutowanie topograficzne	

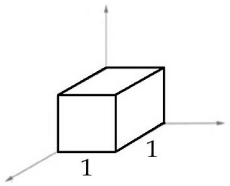
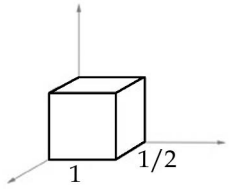
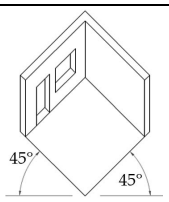
Rzutowanie prostokątne jest oparte na zasadzie rzutowania Monge'a. Przyjęto dwie metody rzutowania, w metodzie europejskiej obiekt odwzorowywany umieszczony jest między obserwatorem a rzutnią, w metodzie amerykańskiej rzutnia umieszczona jest pomiędzy obserwatorem a obiektem. W rzutowaniu prostokątnym wyznacza się rzuty elementu przestrzennego na sześciu wzajemnie prostopadłych płaszczyznach – rzutniach (rys. 7).



Rysunek 7. Rzutowanie metodą europejską: a) rzutowany przedmiot, b) układ rzutów

Tabela 3. Rzutowanie aksonometryczne

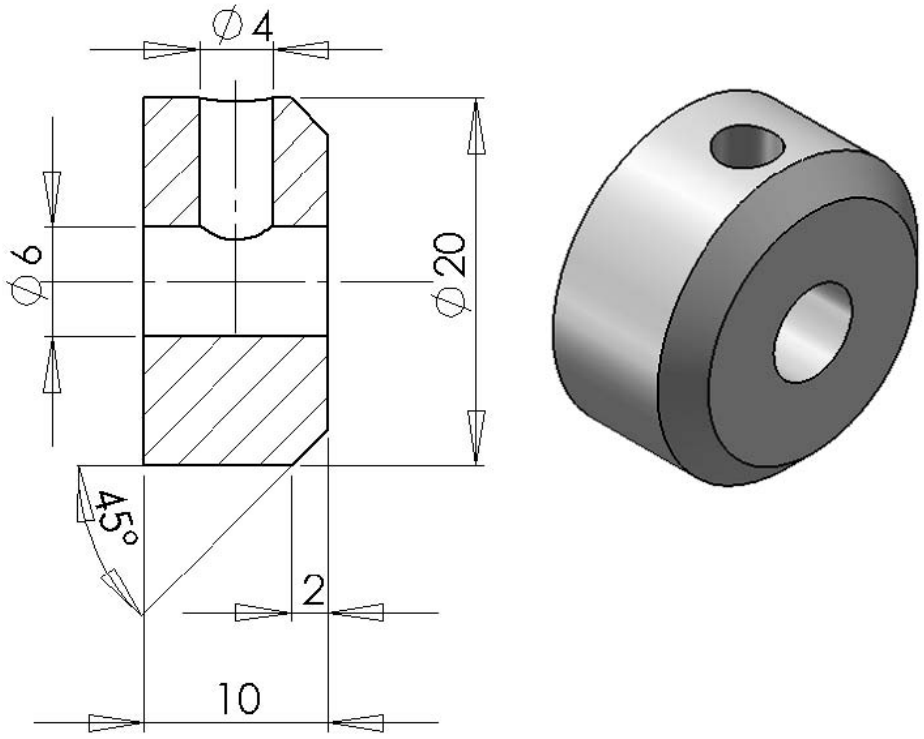
Położenie płaszczyzny rzutu	**Położenie głównego zarysu przedmiotu**	**Metoda przedstawiania na płaszczyźnie**	**Przykład**
Jednakowo nachylona do osi współrzędnych i prostopadle do linii rzutowania	Równoległe do płaszczyzn współrzędnych	Izometria (kąty pomiędzy osiami 120°)	
		Dimetria (prostokątna, kąty 97; 131,5 i 131,5°) (ukośna, kąty 90; 135 i 135°)	
		Trimetria (metoda niezalecana w grafice inżynierskiej)	

	Równolegle do pionowej płaszczyzny rzutu	Aksonometria kawaleryjska (m=1)	
		Aksonometria kawaleryjska (m=0,5)	
	Równoległe do poziomej płaszczyzny rzutu	Planometria	

Rzuty przedmiotów mogą być widokami (zewnętrzny obraz przedmiotu), przekrojami (widok na płaszczyznę przekroju po odrzuceniu tej części przedmiotu, która znajduje się przed płaszczyzną przekroju) lub przekrojami częściowymi.

Ogólne zasady dotyczące doboru liczby i układu rzutów generowanych z modelu cyfrowego:

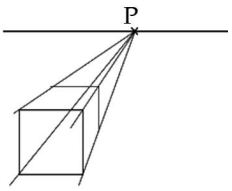
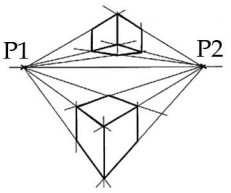
1. Liczba rzutów powinna być ograniczona do minimum wystarczającego do jednoznacznego przedstawienia i zwymiarowania przedmiotu. W praktyce najczęściej wystarczające jest zastosowanie dwóch rzutów.
2. Należy rozpoczynać odwzorowywanie od umieszczenia rzutu głównego (A), w drugiej kolejności rozważyć zasadność umieszczenia rzutów B i C, w trzeciej pozostałych rzutów (D, E, F).
3. Rzut główny (A) powinien przedstawiać przedmiot w położeniu użytkowym bądź obróbkowym od strony przedstawiającej najwięcej jego szczegółów. Jeżeli położenie użytkowe jest różne od poziomego lub pionowego, to przedmiot ten rysuje się w położeniu takim, aby większość jego charakterystycznych płaszczyzn i osi była pozioma bądź pionowa w stosunku do rzutni.
4. W przypadku przedmiotów o złożonych kształtach dobrze jest umieścić pomocniczy widok izometryczny rzutowanego przedmiotu (rys. 8).

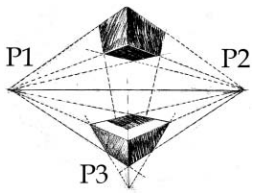


Rysunek 8. Rzut główny i pomocniczy widok izometryczny

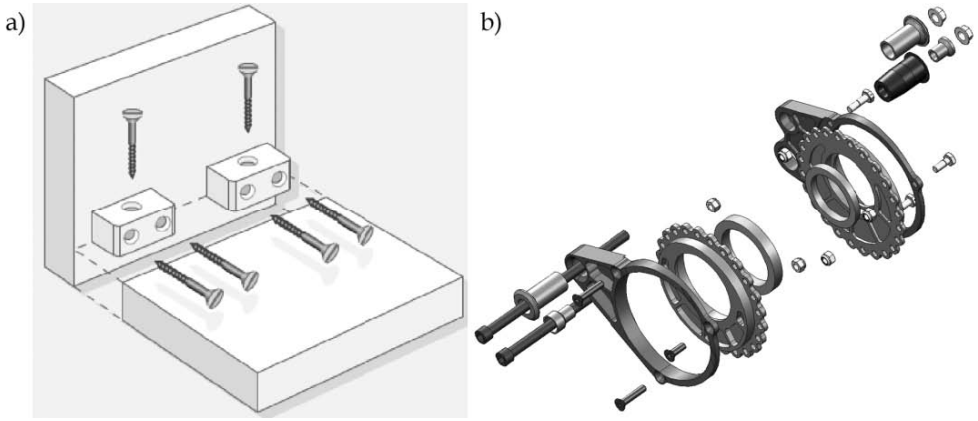
Położenie środka rzutowania w określonej odległości (rozbieżne linie rzutowania).

Tabela 4. Rzutowanie perspektywiczne środkowe

Położenie płaszczyzny rzutu	**Położenie głównego zarysu przedmiotu**	**Metoda przedstawiania na płaszczyźnie**	**Przykład**
Zwykle pionowe	Powierzchnia czołowa równoległa do płaszczyzny rzutu	Perspektywa czołowa; perspektywa o jednym punkcie zbiegu	
	Krawędź równoległa do płaszczyzny rzutu	Perspektywa boczna; perspektywa o dwóch punktach zbiegu	

	Skośne do płaszczyzny rzutu	Perspektywa ukośna; perspektywa o trzech punktach zbiegu	

Często stosowanym sposobem przedstawiania przestrzennych modeli CAD na płaszczyźnie jest zastosowanie tzw. widoku rozstrzelonego (ang. *exploded view*), czyli przedstawienia poglądowego zespołu, zazwyczaj w aksonometrii izometrycznej lub w przedstawieniu perspektywicznym, w którym części składowe są w tej samej podziałce (skali rysunkowej) oraz w prawidłowym położeniu względem siebie, lecz są oddalone od siebie wzdłuż wspólnych osi. Dwa przykłady tego typu rysunku przedstawiono na rysunku 9.



Rysunek 9. Przykłady rysunków rozstrzelonych: a) kątowe połączenie meblowe, b) obudowa łożyskowania mechanizmu różnicowego

Istnieją dwa podstawowe rodzaje grafiki komputerowej:

- grafika rastrowa (ang. *raster graphic*) to sposób zapisu obrazu graficznego polegający na podziale obszaru wyświetlania na pojedyncze punkty (piksele). Każdemu pikselowi przyporządkowane jest jego położenie w obrazie oraz kolor.
- grafika wektorowa (ang. *vector graphic*) to sposób zapisu obrazu oparty na formułach matematycznych. W przeciwieństwie do grafiki rastrowej (opierającej się na zapamiętywaniu koloru i położenia pojedynczych pikseli) grafika wektorowa zachowuje informacje o tworzących kształty obiektów liniach oraz krzywych – włączając ich położenie oraz barwę.

W CAD wykorzystuje się grafikę wektorową, grafika rastrowa znajduje zastosowanie głównie w przygotowywaniu prezentacji fotorealistycznych. Grafika rastrowa jest zależna od przyjętej rozdzielczości w przeciwieństwie do grafiki wektorowej. Wykonywanie niektórych operacji na obiektach rastrowych może powodować znaczne zniekształcenie obrazu, a w formatach z kompresją stratną (np. JPG) każdy zapis poczynionych zmian obniża jakość obrazu. Grafika wektorowa umożliwia większą kontrolę nad wyglądem

i położeniem obiektów rysunku. Podczas edycji rysunku zapisanego w formacie wektorowym poszczególne obiekty można modyfikować i zmieniać przypisane do nich atrybuty niezależnie od pozostałych.

1.4.4. Dokumentacja płaska CAD – wybrane wymagania

Dokumentacja płaska, czyli graficzny zapis konstrukcji w formie wydruków komputerowych, bardzo często jest ostatnim krokiem procesu konstruowania wspomaganego komputerowo. Współczesne oprogramowanie CAD umożliwia wygenerowanie w sposób półautomatyczny rzutów oraz układu wymiarów z modelu cyfrowego. Wspomaganie komputerowe w fazie tworzenia dokumentacji umożliwia:

- tworzenie rysunków technicznych na podstawie geometrycznych modeli 2D, 2,5D oraz 3D,
- automatyczną aktualizację rysunku po wprowadzeniu zmian w modelu cyfrowym (asocjatywność plików),
- zautomatyzowane tworzenie oraz wymiarowanie rzutów i przekrojów,
- tworzenie opisów, tabel, diagramów, list części, zestawień materiałowych,
- zapisywanie i przechowywanie dokumentacji w postaci elektronicznej (w postaci plików i w postaci baz danych),
- łatwe przesyłanie dokumentacji za pomocą Internetu,
- wykonywanie dowolnej liczby wydruków na drukarce lub ploterze.

Podziałki zalecane do stosowania podczas wykonywania dokumentacji płaskiej zawiera tabela 5.

Tabela 5. Podziałki według PN-EN ISO 5455:1998

Podziałki powiększające	100:1 10:1	50:1 5:1	20:1 2:1	
Podziałka naturalna	1:1			
Podziałki zmniejszające	1:2	(1:2,5)	1:5	1:10
		(1:15)		
	1:20	(1:25)	1:50	
	1:200	(1:250)	1:500	1:100
	1:2000	(1:2500)	1:5000	1:1000
	1:20000	(1:25000)	1:50000	1:10000
Podziałki w nawiasach nie są zalecane				

Znormalizowane formaty arkuszy rysunkowych według PN-EN ISO 5457:2002 zawiera tabela 6. Norma zaleca, aby oryginał rysunku wykonany był na najmniejszym arkuszu pozwalającym na uzyskanie niezbędnej czytelności. Formaty większe od A4 drukuje się na drukarkach wielkoformatowych, tzw. ploterach, lub skleja z formatów A4 (każdy

format większy jest wielokrotnością mniejszego, np. A3 można złożyć z dwóch arkuszy A4 itd.).

Linie stosowane na rysunkach technicznych (tabela 7) dzieli się na: (1) linie ciągłe, (2) linie przerywane złożone (przemienne), czyli linie utworzone z regularnie powtarzających się grup takich samych elementów graficznych (kresek i punktów). Wygląd linii przerywanych w CAD (długości kresek, odległości itp.) jest przedmiotem normy EN ISO 128-21:2001.

Tabela 6. Formaty arkuszy według PN-EN ISO 5457:2002

Format	**Wymiary w mm**
A0	841 x 1189
Al	594 x 841
A2	420 x 594
A3	297 x 420
A4	210 x 297
W uzasadnionych przypadkach dopuszcza się stosowanie formatu A5 (148 x 210 mm).	

Tabela 7. Rodzaje i podstawowe przeznaczenie linii według PN-EN ISO 128-20:2002)

Rodzaj linii	**Linia**	**Zastosowanie**
Linia ciągła gruba	━━━━━	– widoczne krawędzie i wyraźne zarysy przedmiotów w widokach i przekrojach – linie obramowania arkusza – zewnętrzny zarys tabliczki rysunkowej – krótkie kreski oznaczające końce płaszczyzny przekroju
Linia ciągła cienka	———	– linie wymiarowe – pomocnicze linie wymiarowe – kreskowanie przekrojów
Linia punktowa (linia rodzaju nr 04 - cienka)	—·—·—·—	– osie symetrii – ślady płaszczyzn symetrii
Linia dwupunktowa (linia rodzaju nr 05)	—··—··—··	– skrajne położenia części ruchomych – zarysy części przyległych – ograniczenie powierzchni niezbędnych do obsługi urządzenia
Linia kreskowa (linia rodzaju nr 02 - cienka)	- - - - - - - - -	– niewidoczne krawędzie i zarysy przedmiotów – linie przyjęte do wyrażenia drugorzędnych danych

Linia ciągła zygzakowa lub falista (cienka)		– linie urwania i przerwania przedmiotów – linie ograniczające przekroje cząstkowe
Linia wielopunktowa (linia rodzaju nr 07 - cienka)		– zarysy i krawędzie drugorzędne na rysunkach budowlanych – zarysy przybliżone, np. na mapach

Na rysunkach technicznych należy stosować grubości linii odpowiadające jednej z pięciu grup linii podanej w PN-EN ISO 128-20:2002. Stosunek wzajemnej grubości poszczególnych odmian linii wykonywanych na określonym arkuszu rysunkowym powinien wynosić 1:3:6 lub 1:2:4.

Pięć zalecanych grup grubości linii przedstawia tabela 8, najmniejszą grubość linii (0,13 mm) dopuszcza się tylko w przypadkach koniecznych (np. na mapach topograficznych).

Tabela 8. Grubości linii stosowane na rysunkach technicznych według PN-EN ISO 128-20:2002

Odmiana linii	**Grupy i podgrupy linii w mm**									
	1*		2		3		4		5	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
	Grubość linii s, mm									
Cienka	0,13	-	0,18	-	0,25	-	0.35	-	0,50	-
	-	0,18	-	0,25	-	0,35	-	0,50	-	0,70
Gruba	0,35		0,50		0,70		1.00		1,40	
Bardzo gruba	0,70		1,00		1,40		2.00		2,00**	
Podgrupę „a” stosuje się jako uprzywilejowaną w rysunku budowlanym, a podgrupę „b” w rysunku maszynowym i elektrycznym. *) Zalecana do stosowania na mapach topograficznych itp. **) Zamiast grubości linii 2,80 mm (wynikającej ze stosunku 1:2:4).										

Grupy grubości linii należy wybierać w zależności od wielkości i złożoności przedstawianego przedmiotu i zagęszczenia linii. Wybrana grupa linii powinna być jednakowa dla wszystkich rysunków wykonanych w tej samej podziałce i przedstawionych na jednym arkuszu rysunkowym.

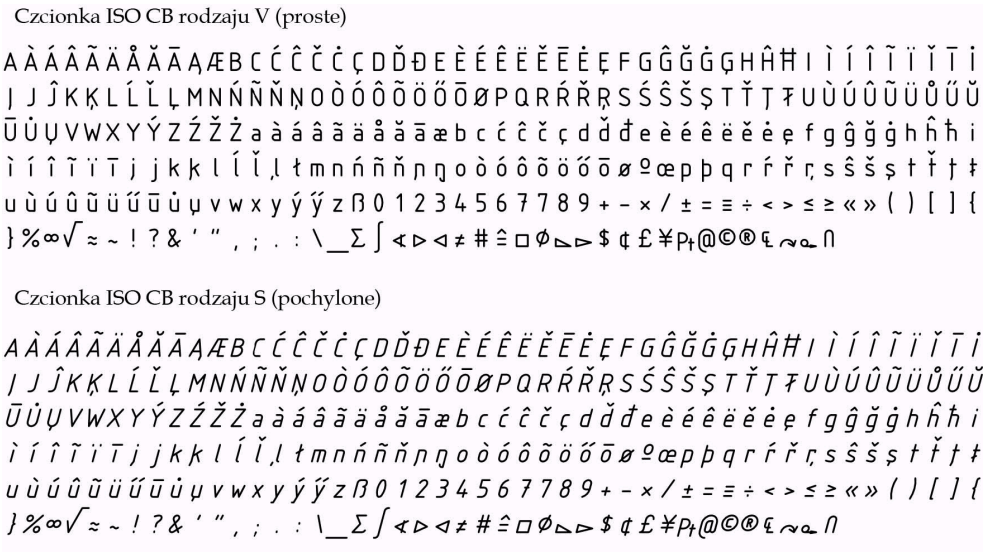
Zasady ogólne wymiarowania ustalone w normie PN-ISO 129:1996 mają zastosowanie we wszystkich dziedzinach techniki (tj. np. mechanice, elektryce, budownictwie lądowym, architekturze itp.). Są uniwersalne i mają za zadanie ułatwić międzynarodową wymianę rysunków. Te zasady opisano szczegółowo w podręcznikach do rysunku technicznego maszynowego.

Forma graficzna wymiarów (wymiary strzałek, rozmiar i umiejscowienie liczb wymiarowych itp.) jest zaimplementowana do wewnętrznych stylów wymiarowania w poszczególnych programach CAD.

Zasady ogólne dotyczące rodzaju i kroju pisma w dokumentacji technicznej wyrobów ustala norma EN ISO 3098-0:2002. Natomiast norma PN-EN ISO 3098-5:2002 zawiera wymagania podstawowe oraz zasady stosowania pisma w CAD, dzieląc pismo na następujące rodzaje:

- pismo rodzaju CB, proste (V),
- pismo rodzaju CB, pochyłe (S),
- pismo rodzaju CA, proste (V),
- pismo rodzaju CA, pochyłe (S).

Do stosowania w CAD zalecane jest pismo CB proste (V) przedstawione na rysunku 10.


Czcionka ISO CB rodzaju V (proste)
A À Á Â Ã Ä Å Ă Ā Ą Æ B C Ć Ĉ Č Ċ Ç D Ď Đ E È É Ê Ë Ě Ē Ė Ę F G Ĝ Ğ Ġ Ģ H Ĥ Ħ I Ì Í Î Ĩ Ï Ǐ Ī İ
J Ĵ K Ķ L Ĺ Ľ Ļ M N Ń Ñ Ň Ņ O Ò Ó Ô Õ Ö Ő Ō Ø P Q R Ŕ Ř Ŗ S Ś Ŝ Š Ş T Ť Ţ Ŧ U Ù Ú Û Ũ Ü Ů Ű Ŭ
Ū Ù Ų V W X Y Ý Z Ź Ž Ż a à á â ã ä å ă ā æ b c ć ĉ č ç d ď đ e è é ê ë ě ė ę f g ĝ ğ ġ h ĥ ħ i
ì í î ĩ ï ī j j k ķ l Í ľ ļ ł m n ń ñ ň ņ ŋ o ò ó ô õ ö ő ō ø º œ p þ q r ŕ ř ŗ s ŝ š ş t ť ţ ŧ
u ù ú û ũ ü ű ū ù ų v w x y ý ŷ z ß 0 1 2 3 4 5 6 7 7 8 9 + − × / ± = ≡ ÷ < > ≤ ≥ « » ( ) [ ] {
} % ∞ √ ≈ ~ ! ? & ' " , ; . : \ _ Σ ∫ ∢ ▷ ◁ ≠ # ĉ □ ∅ ◺ ◻ $ ¢ £ ¥ ₧ @ © ® ℄ ⁓ ◠ ∩
Czcionka ISO CB rodzaju S (pochylone)
A À Á Â Ã Ä Å Ă Ā Ą Æ B C Ć Ĉ Č Ċ Ç D Ď Đ E È É Ê Ë Ě Ē Ė Ę F G Ĝ Ğ Ġ Ģ H Ĥ Ħ I Ì Í Î Ĩ Ï Ǐ Ī İ
J Ĵ K Ķ L Ĺ Ľ Ļ M N Ń Ñ Ň Ņ O Ò Ó Ô Õ Ö Ő Ō Ø P Q R Ŕ Ř Ŗ S Ś Ŝ Š Ş T Ť Ţ Ŧ U Ù Ú Û Ũ Ü Ů Ű Ŭ
Ū Ù Ų V W X Y Ý Z Ź Ž Ż a à á â ã ä å ă ā æ b c ć ĉ č ç d ď đ e è é ê ë ě ė ę f g ĝ ğ ġ h ĥ ħ i
ì í î ĩ ï ī j j k ķ l Í ľ ļ ł m n ń ñ ň ņ ŋ o ò ó ô õ ö ő ō ø º œ p þ q r ŕ ř ŗ s ŝ š ş t ť ţ ŧ
u ù ú û ũ ü ű ū ù ų v w x y ý ŷ z ß 0 1 2 3 4 5 6 7 7 8 9 + − × / ± = ≡ ÷ < > ≤ ≥ « » ( ) [ ] {
} % ∞ √ ≈ ~ ! ? & ' " , ; . : \ _ Σ ∫ ∢ ▷ ◁ ≠ # ĉ □ ∅ ◺ ◻ $ ¢ £ ¥ ₧ @ © ® ℄ ⁓ ◠ ∩

Rysunek 10. Czcionka stosowana w dokumentacji CAD

Zalecane wysokości „h" pisma w dokumentacji technicznej przedstawia tabela 9; przeliczono je na punkty typograficzne stosowane w DTP (DeskTop Publisching), zaokrąglając wartości.

Tabela 9. Zalecane wysokości pisma do stosowania w dokumentacji technicznej

Wymiar metryczny według PN-EN ISO 3098-5:2002 [mm]	**Wymiar przeliczony na punkty typograficzne [pt]**
1,8	5
2,5	7
3,5	10
5	14
7	20
10	28

14	40
20	57
1 pt = 0,3514 mm (gdzie: pt – punkt typograficzny systemu Pica (1 pt = 1/12 pica = 0,3514 mm)	

Zalecana grubość linii dla pisma CB wynosi 1/10 h.

1.5. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 1.

1. Podaj definicję projektowania technicznego.
2. Zdefiniuj obiekt projektowania.
3. Podaj główne ogólne zasady projektowania technicznego.
4. Wymień trzy fundamentalne wymagania dla wyrobu (obiektu technicznego).
5. Omów zasadę optymalnego stanu obciążenia.
6. Omów zasadę optymalnego tworzywa.
7. Wymień rodzaje zapisu konstrukcji.
8. Wymień trzy pryncypialne zasady zapisu konstrukcji.
9. Scharakteryzuj technikę rzutowania prostokątnego.
10. Wymień i scharakteryzuj dwa podstawowe rodzaje grafiki komputerowej.
11. Co to jest tzw. rysunek rozstrzelony?
12. Jaki jest wzajemny stosunek grubości linii cienkiej, grubej i bardzo grubej?
13. Do czego służy linia cienka dwupunktowa (kreska – dwie kropki – kreska)?
14. Podaj przykładowy szereg grubości linii: cienkiej, grubej i bardzo grubej?
15. Jaka jest najmniejsza zalecana wysokość pisma w dokumentacji CAD?

2. Komputerowo wspomagane projektowanie – CAD

2.1. Wprowadzenie

CAD (Computer Aided Design) to zastosowanie sprzętu i oprogramowania komputerowego w projektowaniu technicznym. Znamienne dla CAD jest cyfrowe modelowanie geometryczne mające na celu określenie postaci konstrukcyjnej wyrobu (jednego obiektu lub układu obiektów). Definiowaną postać konstrukcyjną tworzą cechy: geometryczne, dynamiczne oraz technologiczne (w tym materiałowe). Jak wspomniano we wstępie, CAD jest podsystemem komputerowo wspomaganego wytwarzania CIM (Computer Integrated Manufacturing). CIM można zaklasyfikować jako część systemu zarządzania cyklem życia produktu PLM (Product Lifecycle Management).

Zadania inżynierskie, które mogą być realizowane za pomocą komputera, to:

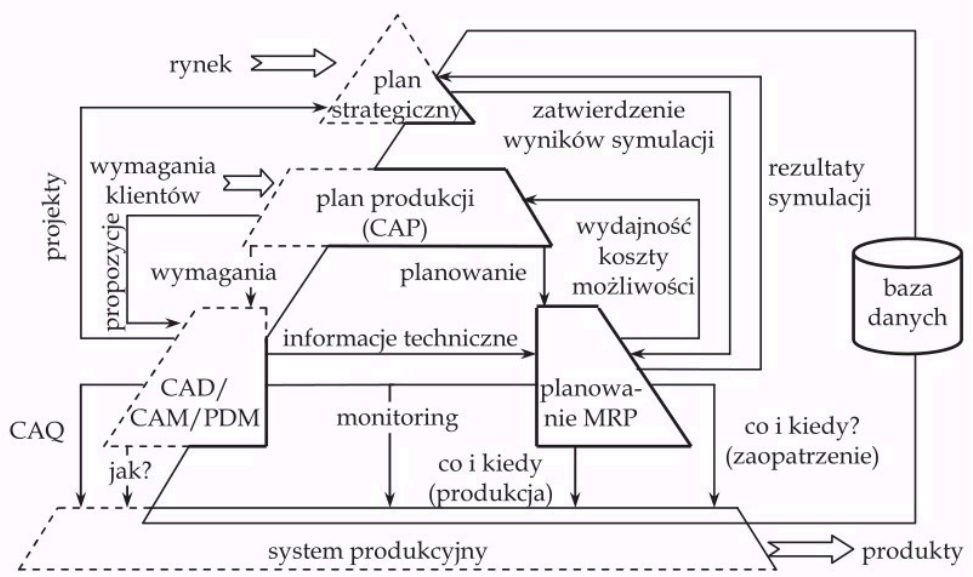
- zarządzanie informacjami (wyszukiwanie, gromadzenie, przetwarzanie, przechowywanie),
- modelowanie cyfrowe ułatwiające badanie i ocenę rozwiązań projektowych (np. wirtualne prototypowanie, wizualizacja, wykonywanie obliczeń wytrzymałościowych),
- wspomaganie podejmowania decyzji,
- tworzenie dokumentacji technicznej.

Ogólny schemat PLM przedstawiono na rysunku 11.

Rysunek 11. Schemat zarządzania cyklem życia produktu (PLM)

Informacje przetwarzane przez przemysłowe systemy PLM dotyczą m.in. parametrów wyrobu: technicznych, ekonomicznych, marketingowych, normatywnych, prawnych itp.

Model CIM przedstawiono na rysunku 12. Na wejściu systemu znajdują się informacje o rynku oraz wymagania klientów, na wyjściu – produkty. Podstawą struktury CIM jest system produkcyjny. Podsystem CAD/CAM znajduje się na skrzyżowaniu przepływów informacyjnych pomiędzy planowaniem strategicznym, planowaniem produkcji (CAP), planowaniem zapotrzebowania materiałowego (MRP) a systemem produkcyjnym.



Rysunek 12. Model CIM (opracowano na podstawie [Waldner 1992] oraz [Tóth i Erdélyi 2006])

Ściśle zazębiają się z CAD inne podsystemy CIM, takie jak CAM (w tym CAP) i PDM; częściowo zazębiają się CAPP, CAQ, MRP itd.

CAM (Computer Aided Manufacturing) – komputerowo wspomagane wytwarzanie – to techniki i narzędzia wspomagające tworzenie i aktywizowanie programów NC na poziomie wydziału produkcyjnego oraz nadzór, sterowanie urządzeniami i procesami wytwarzania i montażu na najniższym poziomie systemów wytwórczych. Ich funkcje odnoszą się zazwyczaj do wszystkich urządzeń sterowanych numerycznie, a więc do obrabiarek, współrzędnościowych maszyn pomiarowych, robotów, systemów transportowych oraz innych urządzeń obsługiwanych np. za pomocą sterowników PLC.

Podsystemem CAM są techniki CAP (Computer Aided Planing), czyli metody i narzędzia wspomagające projektowanie technologiczne,

obejmujące opracowanie dokumentacji technologicznej z uwzględnieniem modelu geometrycznego przedmiotu, jego stanów pośrednich, narzędzi, oprzyrządowania, rodzaju maszyn i parametrów obróbki, ale bez konkretnego określenia terminów i stanowisk wytwórczych. Systemy CAP wspomagają prace związane z programowaniem urządzeń sterowanych numerycznie: obrabiarek, robotów, współrzędnościowych maszyn pomiarowych, systemów transportowych.

CAPP (Computer Aided Process Planning) – komputerowo wspomagane planowanie procesów. Ta klasa systemów jest szersza niż klasa CAP. W zakresie zastosowań CAPP mieszczą się także wszystkie metody i techniki technologicznego przygotowania produkcji realizowanej w konwencjonalnych technologiach wspomaganych technikami komputerowymi i systemami ekspertowymi.

CAQ (Computer Aided Quality Control) – komputerowo wspomagane sterowanie jakością. Są to metody i techniki komputerowego wspomagania projektowania, planowania i realizacji procesów pomiarowych, a także procedur kontroli jakości. Systemy te, najczęściej sprzężone z systemami CAD przez model geometryczny lub przez programy bądź procedury pomiarowe, są zintegrowane z systemami PPC, CAP i CAM, głównie w części odnoszącej się do pomiarów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej.

MRP (Material Requirements Planning) – planowanie zapotrzebowania materiałowego wspomagane technikami komputerowymi polega na optymalizacji kosztów i czasu wykonania m.in. przez ścisłe określenie czasów dostaw surowców i półproduktów i co za tym idzie – redukcję zapasów oraz lepsze wykorzystanie posiadanej powierzchni magazynowej.

Tabela 10 zawiera klasyfikację podsystemów CIM z podziałem na dwa główne rodzaje zadań inżynierskich: planowanie i sterowanie.

Tabela 10. Klasyfikacja funkcjonalna podsystemów CIM

Koncypowanie	CAE/CAD	
Projektowanie	CAD/CAE	
Planowanie technologiczne	CAP	
Programowanie urządzeń CNC	CAM	Planowanie
Sterowanie urządzeniami CNC	CAM	Sterowanie
Logistyka	APS	
Gospodarka materiałowa	MRP	
Sterowanie montażem	CAA	

Sterowanie jakością	CAQ

Rozwinięcia skrótów zastosowanych w tabeli 10 zamieszczono w „Słowniku ważniejszych terminów CAx".

Stopień wykorzystania technik CAD na poszczególnych etapach projektowania technicznego przedstawia tabela 11.

Oprogramowanie CAD jest przeznaczone do wspomagania czynności inżyniera zwłaszcza w pierwszych fazach rozwoju produktu. Programy CAD służą nie tylko do rysowania i modyfikacji dokumentacji konstrukcyjnej, ale przede wszystkim do projektowania rozumianego jako algorytm bardzo wielu działań inżynierskich przedstawiony na rysunku 13.

Tabela 11. Wykorzystanie technik CAD w projektowaniu technicznym

Rodzaj projektu		**Fazy projektowania**	**Czynności**	**Zastosowanie technik CAD**
Wyrób nowy		la. Rozpoznanie potrzeby	Marketing	Brak
	Wyrób modernizowany	lb. Koncepcja	Opracowanie listy wymagań	Minimalne lub brak
			Opracowanie wariantów koncepcyjnych	
			Uporządkowanie struktury funkcjonalnej	
			Ocena koncepcji rozwiązania	
		2a. Kształtowanie geometrii	Kształtowanie wstępne	3D
			Przyjęcie warunków wstępnych	3D
			Modelowanie (obliczenia wstępne)	3D

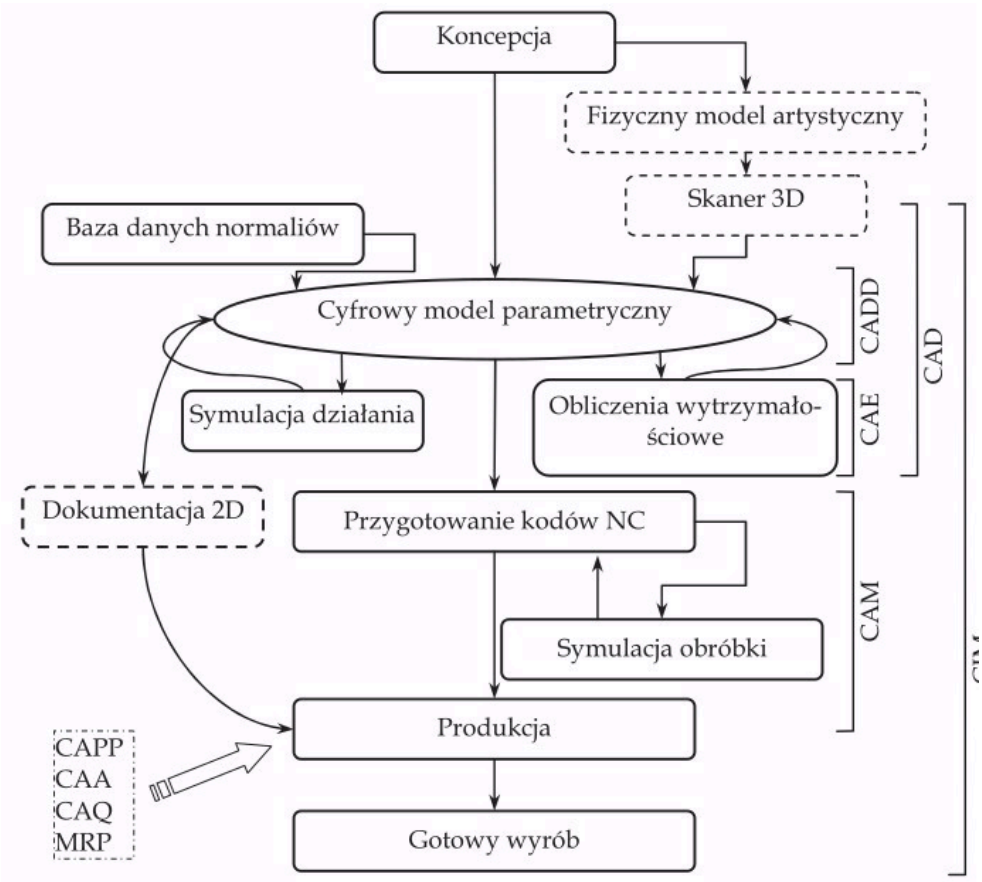
			Obliczenia optymalizacyjne	3D
			Obliczenia sprawdzające	3D
			Kształtowanie końcowe	2D i 3D
		2b. Dokumentacja	Tworzenie listy elementów	2D i 3D
			Tworzenie rysunków złożeniowych i wykonawczych	2D i 3D
			Eksport do systemów CAM	3D

Rozwinięcia skrótów zastosowanych na rysunku 13 zamieszczono w „Słowniku ważniejszych terminów CAx".

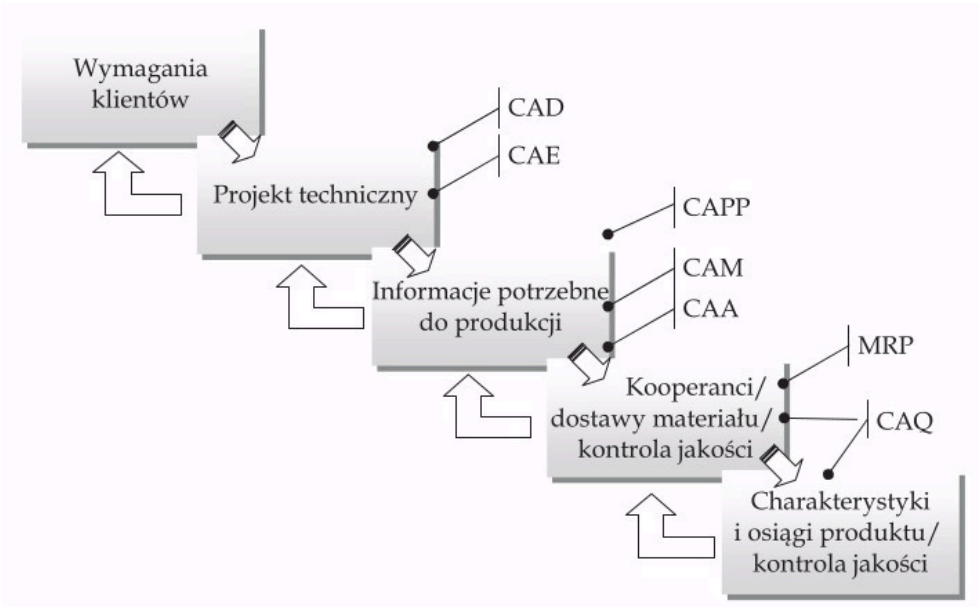
CAD to metody projektowania, w których wykorzystuje się narzędzia komputerowe wspomagające prace w zakresie projektowania, modelowania geometrycznego, analiz wytrzymałościowych oraz tworzenia i opracowywania dokumentacji konstrukcyjnej, w tym struktury produktu i list kompletacyjnych. Systemy CAD mogą być też stosowane do opracowywania dokumentacji technologicznej (karty i formularze operacji technologicznych wraz ze szkicami) przeznaczonej do obróbki na konwencjonalnych obrabiarkach.

Przepływy informacji technicznej w przedsiębiorstwie oraz miejsce technik CAD w dokumentowaniu wyrobu przedstawia rysunek 14.

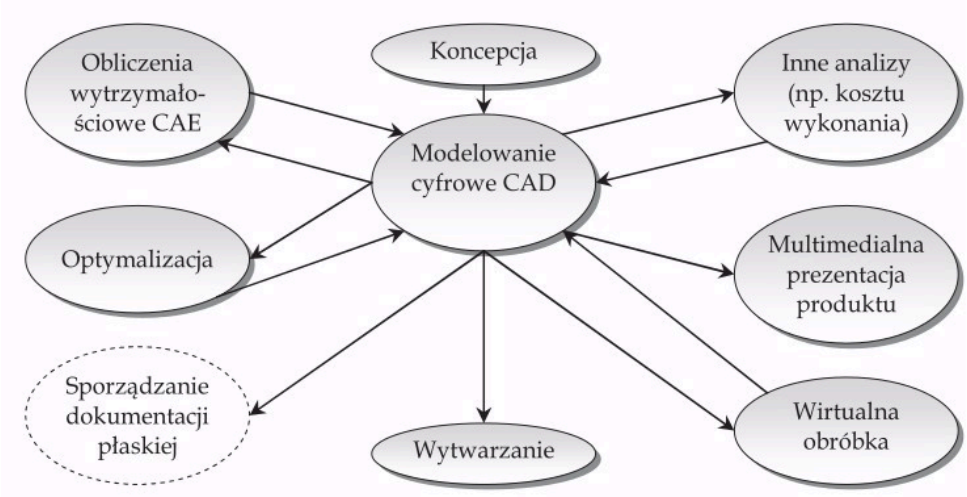
Otoczenie informacyjne CAD przedstawia rysunek 15.



Rysunek 13. Proces projektowania i wytwarzania wspomagany komputerowo



Rysunek 14. Kierunek przepływu informacji technicznej w przedsiębiorstwie



Rysunek 15. Otoczenie informacyjne CAD

Modelowanie cyfrowe CAD jest etapem pośrednim między koncepcją a wytwarzaniem. Pozostaje dwukierunkowo sprzężone informacyjnie z CAE, optymalizacją, modułem CAM odpowiedzialnym za wirtualną obróbkę oraz z innymi analizami (np. symulacją montażu, analizą wariantów konstrukcyjnych ze względu na koszt wykonania, liczbę części, design i in.). Zwykle w jednym kierunku przepływają informacje z systemu CAD do modułów wykonujących multimedialne prezentacje produktu oraz płaską dokumentację techniczną.

W nowoczesnych systemach przemysłowych proces produkcji może się odbywać bez wykonywania tradycyjnych rysunków dwuwymiarowych.

2.2. Zakres CAD

W zakres CAD wchodzą:

1. Komputerowe odwzorowanie konstrukcji:

- modelowanie cyfrowe,
- wykonywanie dokumentacji rysunkowej z modeli cyfrowych,
- kreślenie, zastosowanie komputera jako rodzaju elektronicznej deski kreślarskiej – CADD.

2. Bazy danych (elementów znormalizowanych, własności materiałowych itp.).

3. Symulacja, wizualizacja i animacja – CAID (cyfrowe prototypowanie, przygotowywanie ofertowych prezentacji fotorealistycznych itp.).

Z CAD częściowo pokrywają się następujące obszary działalności inżynierskiej:

1. Optymalizacja konstrukcji i procesów.
2. Wytrzymałościowe obliczenia inżynierskie (np. metodą elementów skończonych – MES).
3. Inżynieria odwrotna (ang. *Reverse Engineering*) – skanowanie kształtów oraz struktury wewnętrznej obiektów oraz obróbka uzyskanych w ten sposób modeli cyfrowych.
4. Sieci neuronowe (algorytmy sztucznej inteligencji, w tym m.in. systemy ekspertowe – systemy doradcze).
5. Edytory tekstów i arkusze kalkulacyjne w zastosowaniu do projektowania technicznego.

Komputerowe wspomaganie podejmowania decyzji polega na wykorzystaniu algorytmów sztucznej inteligencji tworzących tzw. systemy ekspertowe. System ekspertowy jest programem komputerowym zastępującym specjalistę w danej dziedzinie (wyciąga wnioski i podejmuje decyzje). Systemy ekspertowe są oparte na pozyskiwaniu i przetwarzaniu wiedzy eksperta z danej dziedziny, która jest zapisywana w tzw. bazie wiedzy. Pełny system tego rodzaju składa się z:

- bazy wiedzy,
- bazy danych,
- procedur wnioskowania,
- procedury objaśniania (strategia wnioskowania),
- procedury sterowania dialogiem między użytkownikiem a programem,
- procedury umożliwiającej rozszerzenie oraz modyfikację wiedzy (pozyskiwanie wiedzy).

System ekspertowy może być wbudowany w moduł CAD (vide podpunkt 3.6).

2.3. Rys historyczny CAD

Historia komputerowego wspomagania projektowania jest ściśle związana z postępem w dziedzinie techniki komputerowej. W początkowym okresie rozwoju systemów CAD służyły one wyłącznie do przygotowywania rysunków, będąc czymś w rodzaju elektronicznej deski kreślarskiej, która eliminowała czasochłonne rysowanie, ułatwiała nanoszenie zmian i poprawek. Rozwój oprogramowania przebiegał w kierunku umożliwienia modelowania przestrzennego 3D. Dokumentacja płaska przestała być celem samym w sobie, stając się jedynie wtórnym zapisem rzutów wygenerowanym z cyfrowego modelu trójwymiarowego. Pojawiły się programy specjalizowane dla różnych branż przemysłu: mechanicznej, budowlanej, geodezyjnej itp. Kilkanaście kluczowych dat w rozwoju CAD przedstawiono poniżej.

- 1954 rok – pierwszy program graficzny przeznaczony do interaktywnej pracy opracował D.T. Ross.
- 1957 rok – w Massachusetts Institute of Technology (MIT) zapoczątkowano prace nad numerycznym sterowaniem obrabiarek. APT (Automatic Programming Tool) – Patrick J. Hanratty, program PRONTO.
- 1963 rok – Ivan Sutherland przedstawił w MIT pracę doktorską nt. układu projektant – komputer. Opracował system *Sketchpad* (postać geometryczna w 2D) oraz skonstruował ploter wykreślający rysunki. Sketchpad był pierwszym programem pozwalającym na tworzenie grafiki bezpośrednio na ekranie monitora zamiast wprowadzania kodu i procedur za pośrednictwem klawiatury.
- W roku 1965 firmy IBM, McDonnell i Boeing opracowały eksperymentalny system integrujący komputerowo wspomagane

projektowanie (komputer, monitor graficzny) z komputerowo wspomaganym wytwarzaniem (obrabiarki sterowane numerycznie).

Pod koniec lat siedemdziesiątych XX wieku typowy system CAD kosztował 125 000 dolarów, był zainstalowany na 16-bitowym komputerze z 512 kB RAM i dyskiem twardym o pojemności 20 Mb. Mimo wysokich cen oprogramowania nastąpiło upowszechnienie rozwiązań CAD w wielu dziedzinach przemysłu. W latach osiemdziesiątych na skutek spadku cen sprzętu komputerowego nastąpiło szerokie upowszechnienie zastosowań programów do wspomagania prac projektanta.

- 1981 rok – 3D (Eye Inc.) – pierwszy udany komercyjny program do modelowania 3D (modele powierzchniowe). W tym samym roku firma Unigraphics wprowadziła pierwszy program do modelowania objętościowego[19] (UniSolid).
- 1982 rok – CATIA (Dassault SystÞmes) – kompleksowe zarządzanie cyklem życia produktów (PLM – Product Lifecycle Management).
- 1982 rok – AutoCAD (Autodesk) – przez wiele lat standard w dziedzinie oprogramowania CAD.
- 1988 rok – ProEngineer (Parametric Technology Corporation, PTC) – koncepcja parametryzacji[20] oraz modelowania opartego na cechach konstrukcyjnych FBM (Feature-based Modeling)[21].
- 1989 rok – TopCAD (Top Systems) – pierwszy udany program parametryczny (obecna nazwa T-FLEX).
- 1991 rok – Open GL (Microsoft) – milowy krok w dziedzinie animacji.
- 1993 rok – SolidWorks – wydajne modelowanie 3D.

W latach dziewięćdziesiątych XX wieku nastąpiła integracja w otwarte wielomodułowe i wielofunkcyjne systemy o rozproszonej strukturze danych umożliwiające zarządzanie dokumentacją techniczną.

Jak wspomniano na początku, proces rozwoju systemów CAx rozpoczął się od zastosowania komputera jako elektronicznej deski kreślarskiej służącej do sporządzania płaskiej dokumentacji rysunkowej. Kolejnym krokiem było umożliwienie modelowania przestrzennego ze zautomatyzowanym tworzeniem rzutów i możliwością określania parametrów fizycznych modelu takich jak masa czy pole powierzchni. Modele 3D umożliwiły wydajne przeprowadzanie wytrzymałościowych obliczeń inżynierskich (vide rozdział 7) oraz wykonywanie multimedialnych prezentacji projektowanych wyrobów (vide rozdział 8). Pojawiły się bazy danych elementów znormalizowanych, wprowadzono parametryczny zapis wymiarów geometrycznych modelu, umożliwiając łatwe tworzenie rodzin konstrukcji (vide podpunkt 4.2). Nowe

możliwości to symulacja procesów produkcyjnych oraz wydajne modelowanie oparte na cechach konstrukcyjnych FBM, np. podcięcie, fazowanie, otwór itp. Najnowszym osiągnięciem jest wyposażenie systemów CAD w moduły sztucznej inteligencji i ich integracja z systemami ekspertowymi (KBE – Knowledge Based Engineering, vide podpunkt 3.6).

2.4. Zarządzanie i archiwizacja dokumentacji CAD

Pełna dokumentacja wyrobu składa się z:

- dokumentacji konstrukcyjnej (np. modeli cyfrowych CAD, rysunków konstrukcyjnych, listy części, karty zamówienia itp.),
- dokumentacji technologicznej (np. modeli cyfrowych CAM, opisu technologii wykonania, wymagań dla wyrobu gotowego itp.),
- dokumentacji normatywnej (np. analizy ryzyka użytkowania, deklaracji zgodności CE, sprawozdań potwierdzających wykonane badania, certyfikaty i atesty),
- instrukcji i dokumentów handlowych (np. etykiet, instrukcji obsługi, karty gwarancyjnej, cenników, list części zamiennych, prospektów reklamowych itp.).

Wszystkie wymienione dane są zwykle przechowywane w postaci elektronicznej w bazach danych w formie umożliwiającej ich aktualizację oraz zapis historii przeprowadzanych zmian. Ze względu na konieczność zachowania tajności informacji dostęp do danych jest ograniczony, a systemy komputerowe pracują w wewnętrznej sieci zakładowej zabezpieczonej przed atakami z zewnątrz. W nowoczesnych przedsiębiorstwach konieczna jest centralna dyspozycyjność informacji i dostęp on-line do danych opisowych produktów w różnych językach. Temu celowi służy oprogramowanie typu PDM (Product Data Management), które jest zestawem narzędzi usprawniających tworzenie nowych produktów i ich odmian przez ułatwianie bezpiecznego dostępu do jednego źródła informacji w celu uzyskania dokładnych informacji o produkcie, w tym: danych konstrukcyjnych, zestawień podzespołów, wykazów materiałów, zamówień zmian inżynieryjnych itp.

System klasy PDM jest podsystemem PLM (Product Lifecycle Management) [22], czyli systemu informatycznego służącego do zarządzania cyklem życia produktu, począwszy od koncepcji, przez projektowanie szczegółowe, fazę wytwarzania, aż do fazy posprzedażnej (serwisu). Kluczową ideą systemu jest integracja przedsiębiorstwa na wielu poziomach: integracja informacji – dostęp do informacji o produkowanym wyrobie dla wszystkich uprawnionych, integracja procesów – zautomatyzowany przepływ danych i informacji, integracja biznesowa – współpraca pomiędzy wydziałami firmy, jej poddostawcami oraz klientami. Typowy system PLM zapewnia również duży stopień integracji z dowolnymi środowiskami CAD/CAM/CAE (np. CATIA, UGS, Pro/E, SolidWorks, Solid Edge, AutoCAD, Inventor itp.), pakietami biurowymi (np. MS Office, Open Office, StarOffice), systemami bazodanowymi, systemami planowania zasobów ERP/MRP (np. SAP, BAAN) oraz zarządzania łańcuchem dostaw (SCM) i systemami planowania popytu.

Tabela 12. Oprogramowanie do zarządzania dokumentacją techniczną (PDM) oraz zarządzania cyklem życia produktu (PLM) dostępne w Polsce

Oprogramowanie	**Typ**	**Producent**	**Dystrybutor**
CATIA	CAx/PLM	Dassault Systemes	P.P.W. KOLTECH Sp. z o.o. KS Automotive Sp. z o.o.
ENOVIA/ENOVIA MatrixOne	PLM	Dassault Systemes	IBM Polska Sp. z o.o.
Productstream	PDM	Autodesk	Autodesk
SMARTEAM	PLM/PDM	Dassault Systemes	P.P.W. KOLTECH Sp. z o.o.
Teamcenter	PDM	UGS Corp.	UGS Sp. z o.o.
UGS Velocity Series	CAx/PDM*	UGS Corp.	UGS Sp. z o.o.

2.5. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 2.

1. Wyjaśnij skrót CAx.
2. Wyjaśnij skróty CAD i CADD.

3. Jakiego rodzaju problemy inżynierskie można rozwiązywać za pomocą oprogramowania inżynierskiego?
4. Wyjaśnij skrót i omów strukturę CIM.
5. Jakie rodzaje działalności inżynierskiej wchodzą w zakres CAD?
6. Z jakiego rodzaju informacji składa się pełna dokumentacja techniczna wyrobu?

3. Podstawy modelowania cyfrowego

3.1. Dane przetwarzane przez systemy CAD

Istotą zaawansowanych systemów CAD jest możliwość modelowania cyfrowego – tworzenia wirtualnych modeli projektowanych obiektów w wirtualnej przestrzeni komputera. Interfejsy użytkownika w poszczególnych programach różnią się pewnymi atrybutami, ale w każdym z tych programów można wyróżnić uogólnione metody modelowania cyfrowego. Ten sam model cyfrowy można w ramach jednej metody wykonać na wiele sposobów. W przypadku modelu skomplikowanego obiektu liczba tych sposobów jest praktycznie nieograniczona. Modele wykonane różnymi technikami, mimo pozornej identyczności, nie są równoznaczne, rozszyfrowanie struktury złożonego modelu wykonanego przez innego projektanta może się okazać niezwykle trudne, a znajomość struktury jest nieodzowna w przypadku pojawienia się konieczności wprowadzenia zmian w projekcie.

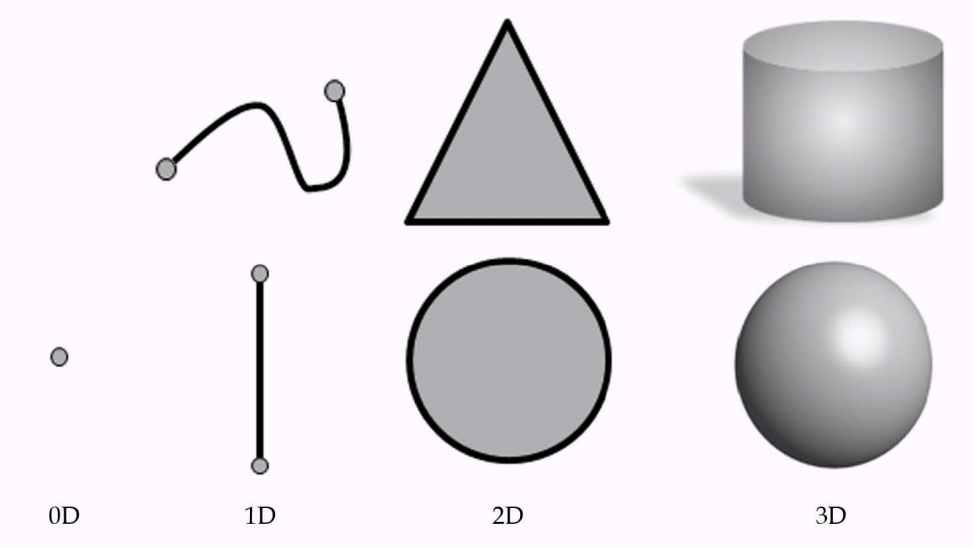
Z nieograniczonej liczby hipotetycznych sposobów tworzenia cyfrowych modeli różniących się geometrią i topologią tylko niewielki procent zapewnia wykonanie poprawnego modelu (podatnego na parametryzację[23] i na wprowadzanie zmian projektowych). W oprogramowaniu CAD/CAM/CAE, inaczej niż w typowych programach graficznych, w których celem jest uzyskanie jedynie efektów wizualnych, model ma do spełnienia różne zadania, może służyć miedzy innymi do[24]:

- wygenerowania rysunkowej dokumentacji technicznej,

- eksportu do innych systemów CAD/CAM z możliwie najmniejszą liczbą błędów geometrii,
- cyfrowego prototypowania (analizy kinematycznej funkcjonalności, weryfikacji ergonomicznej, analizy możliwości montażu, analizy dynamiki elementów i zespołów),
- obliczeń wytrzymałościowych (zwłaszcza metodą elementów skończonych),
- wykonania dokumentacji CAM (zaprojektowania operacji wytwórczych i ich weryfikacji, uzyskania dodatkowych informacji koniecznych w procesie wytwórczym – np. wymiarów półfabrykatów),
- wizualizacji produktu (np. do wykonania multimedialnej prezentacji do celów marketingowych).

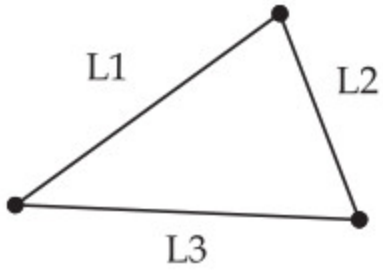
Elementy geometryczne wykorzystywane w cyfrowym modelowaniu można sklasyfikować, stosując kryterium liczby wymiarów w przestrzeni (rys. 16):

- 0D – zerowymiarowe – punkt,
- 1D – jednowymiarowe – linia (np. odcinek, okrąg),
- 2D – dwuwymiarowe – obszar (np. trójkąt, koło),
- 3D – trójwymiarowe – bryła (np. walec, kula).



Rysunek 16. Przykłady elementów geometrycznych

W zależności od przyjętego modelu danych przestrzennych wymienione elementy geometryczne mogą być określane bezpośrednio ciągiem punktów o określonych współrzędnych lub budowane hierarchicznie, tzn. element o wymiarze wyższym budowany jest z odpowiedniej liczby elementów o wymiarze niższym, np. element 2D może być zbudowany z przynajmniej trzech elementów 1D, przykład takiej budowy przedstawia rysunek 17.



Rysunek 17. Hierarchiczna budowa obiektów – obiekt 2D zbudowany z trzech obiektów 1D

Dane wykorzystywane w systemach CAD to:

- podstawowe dane geometryczne (kształt i wymiary) reprezentowane przez odpowiednie modele 2D (obecnie coraz rzadziej) lub 3D (modele krawędziowe, powierzchniowe lub bryłowe),
- dodatkowe dane geometryczne, np. drzewo strukturalne modelu, historia wykonywanych na nim operacji, pomocnicze elementy konstrukcyjne (punkty, linie i płaszczyzny konstrukcyjne), więzy kinematyczne i postaciowe,
- topologiczne – informacje o relacjach pomiędzy obiektami,
- arkusz danych parametrycznych (lista parametrów, zależności funkcyjne pomiędzy nimi oraz ich wartości),
- wtórne dane rysunkowe wygenerowane z modeli 3D (klasyczna dokumentacja techniczna w postaci zwymiarowanych rysunków wykonawczych lub złożeniowych),
- adnotacje dostępne w formie tekstowej dołączone przez konstruktora (opcjonalne opisy i komentarze do poszczególnych

elementów projektowanego obiektu),
- dane technologiczne produktu (PMI) zawierające jego strukturę, specyfikację list części i indeksów materiałowych (np. dane o odchyłkach kształtu – GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing)] i wiele innych (vide „Słownik ważniejszych terminów CAx"),
- osadzone obiekty rastrowe[25].

3.2. Układy współrzędnych

Układ współrzędnych (ang. *coordinate system*) jest podstawą do ustalenia związku pomiędzy każdym z punktów w przestrzeni a odpowiadającymi im współrzędnymi i odwrotnie; jest podstawowym sposobem parametryzacji punktów stosowanym w CAD. Współrzędne punktu są zbiorem uporządkowanych w określony sposób[26] wartości liczbowych (i odpowiadających im jednostek miar). W oprogramowaniu CAD współrzędne definiują lokalizację obiektów w wirtualnej przestrzeni modelowania. Zwyczajowo przestrzeń dwuwymiarową określa się skrótem 2D, a przestrzeń trójwymiarową – 3D (ang. *dimension* – wymiar). W CAD stosuje się pięć układów współrzędnych, dwa na płaszczyźnie i trzy w przestrzeni trójwymiarowej, w praktyce dominujące znaczenie mają układy prostokątne:

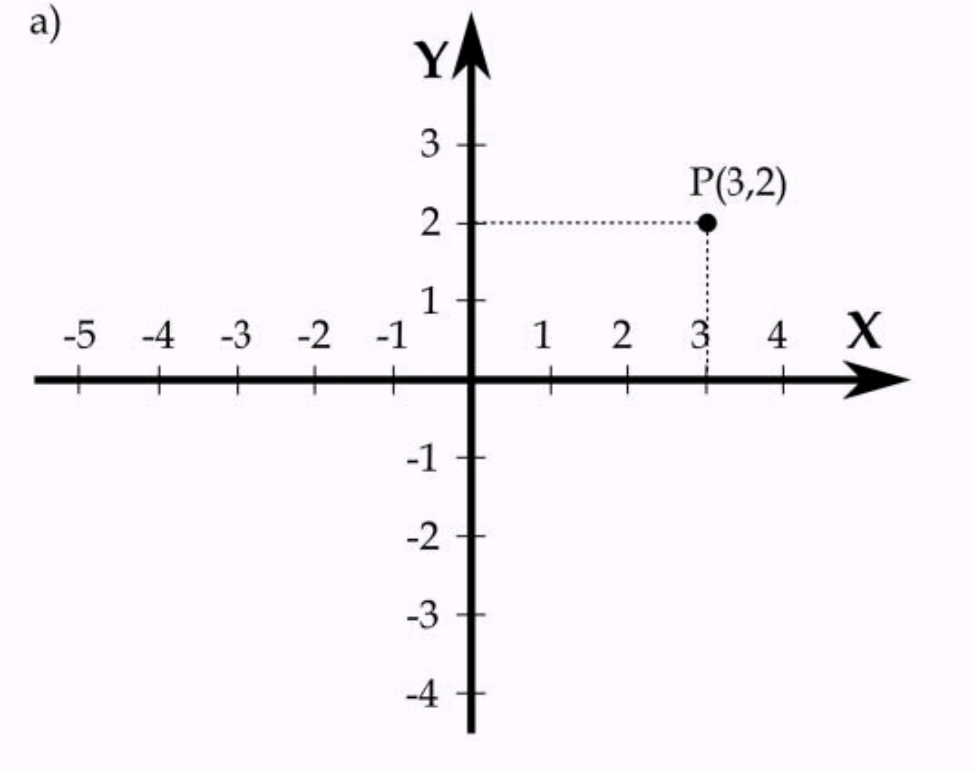
1. Na płaszczyźnie (2D):
    - prostokątny (ortokartezjański),
    - biegunowy.
2. W przestrzeni trójwymiarowej (3D):
    - prostokątny (ortokartezjański),
    - biegunowy,
    - walcowy (cylindryczny).

Ad. 1. Układy dwuwymiarowe

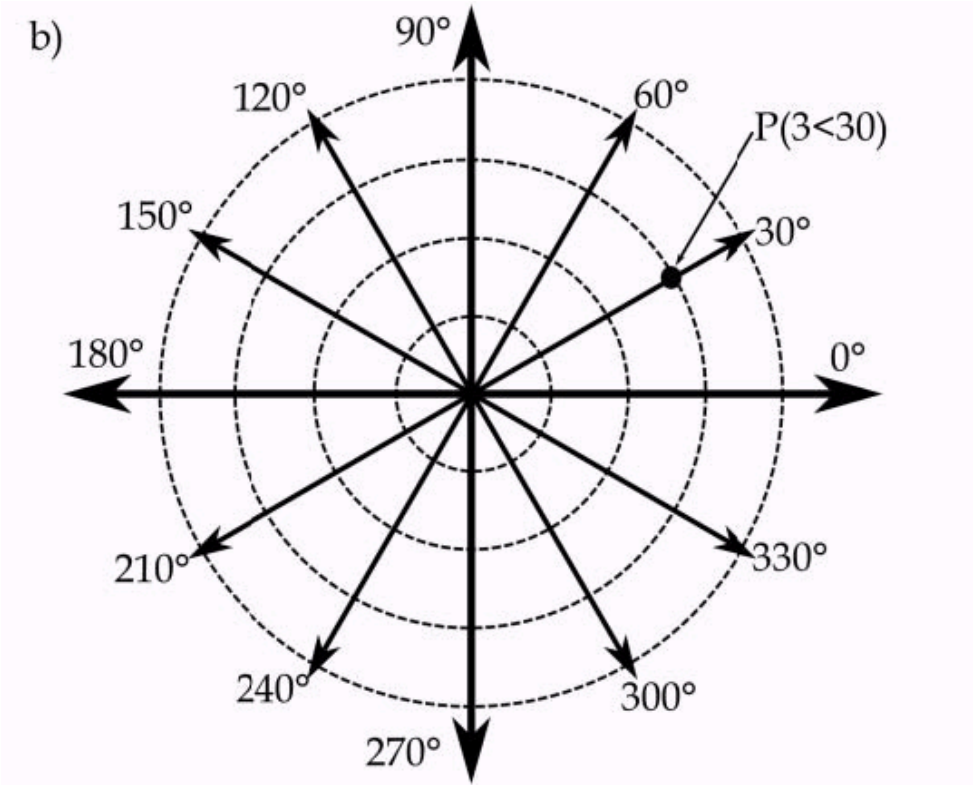
Każdy punkt na płaszczyźnie może być zdefiniowany za pomocą dwóch współrzędnych. W przypadku najczęściej stosowanego **układu współrzędnych prostokątnych**[27] są to odległości od miejsca przecięcia rzutów punktu na ortogonalne względem siebie dwie proste (oznaczane X oraz Y). Nazwa „prostokątny układ współrzędnych" pochodzi od sposobu wyznaczania współrzędnych punktu (przez rzut prostokątny). Prostokątny układ współrzędnych bywa nazywany kartezjańskim układem współrzędnych[28]. W tego typu układzie miejsce przecięcia prostych oznaczanych literami X i Y nazywane jest początkiem układu i oznaczane literą O. Każda z prostych składa się z dwóch osi: prosta X z osi OX^+ i OX^-, a prosta Y z osi OY^+ i OY^-.

Do modelowania obiektów o symetrii kołowej lepiej nadaje się **układ współrzędnych biegunowych**. Współrzędne biegunowe, podobnie jak współrzędne prostokątne, składają się z dwóch liczb, jednak w tym przypadku pierwsza (tzw. współrzedna radialna *r*) określa odległość od początku układu współrzędnych, a druga (tzw. współrzędna kątowa Θ) – kąt kierunkowy względem osi X. Zazwyczaj kąty dodatnie mierzone są przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara, a katy ujemne zgodnie z nim. Układy współrzędnych prostokątny oraz biegunowy przedstawia rysunek 18.

a)

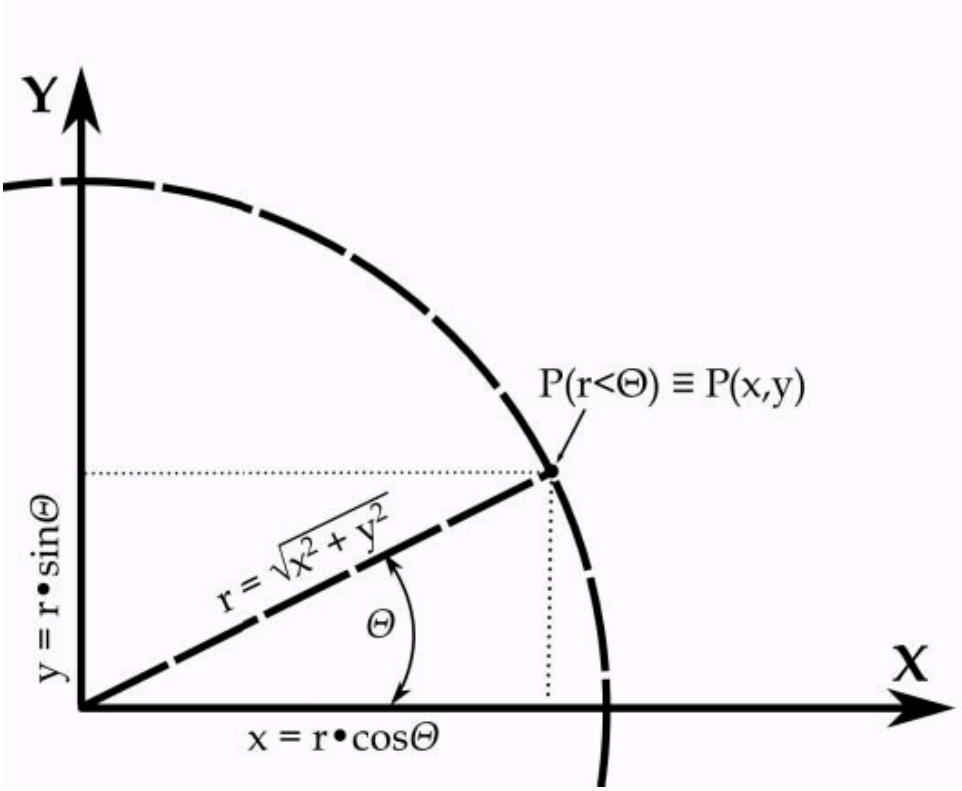

Y
X
P(3,2)
3
2
1
-1
-2
-3
-4
-5
-4
-3
-2
-1
1
2
3
4

b)


90°
120°
60°
P(3<30)
150°
30°
180°
0°
210°
330°
240°
300°
270°

Rysunek 18. Układy współrzędnych stosowane na płaszczyźnie: a) prostokątny, b) biegunowy

Ważniejsze zależności wymiarowe pomiędzy układami prostokątnym a biegunowym zamieszczono na rysunku 19.



Rysunek 19. Zależności pomiędzy układami współrzędnych: prostokątnym a biegunowym

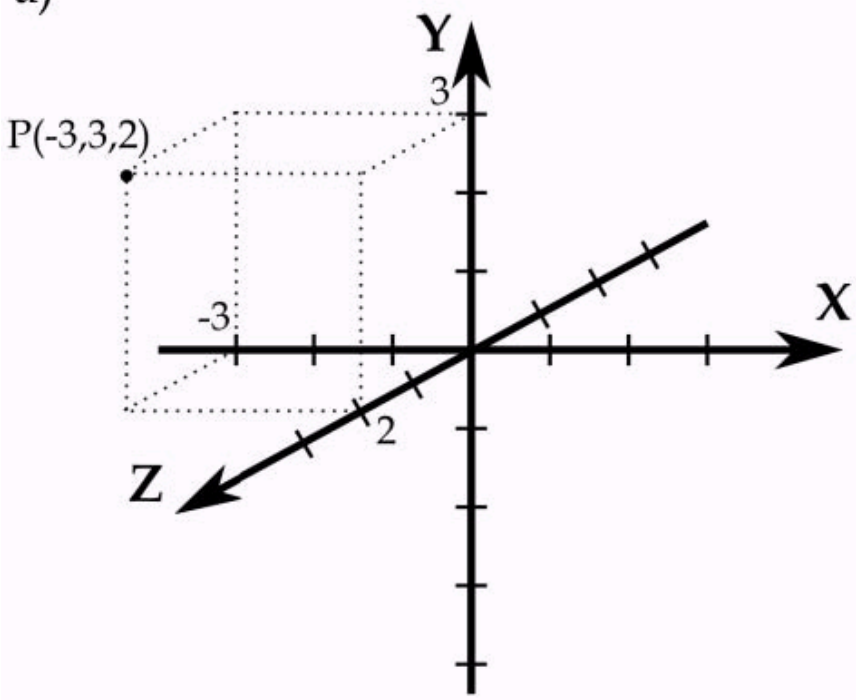
Składnia wspórzędnych prostokątnych to (x,y), natomiast składnia współrzędnych biegunowych – (r<Θ). W programach CAD istnieje możliwość wprowadzania współrzędnych względnych, czyli liczonych nie od początku układu współrzędnych, lecz od ostatniego narysowanego punktu, oraz tworzenia lokalnych, tymczasowych układów współrzędnych.

Ad. 2. Układy trójwymiarowe

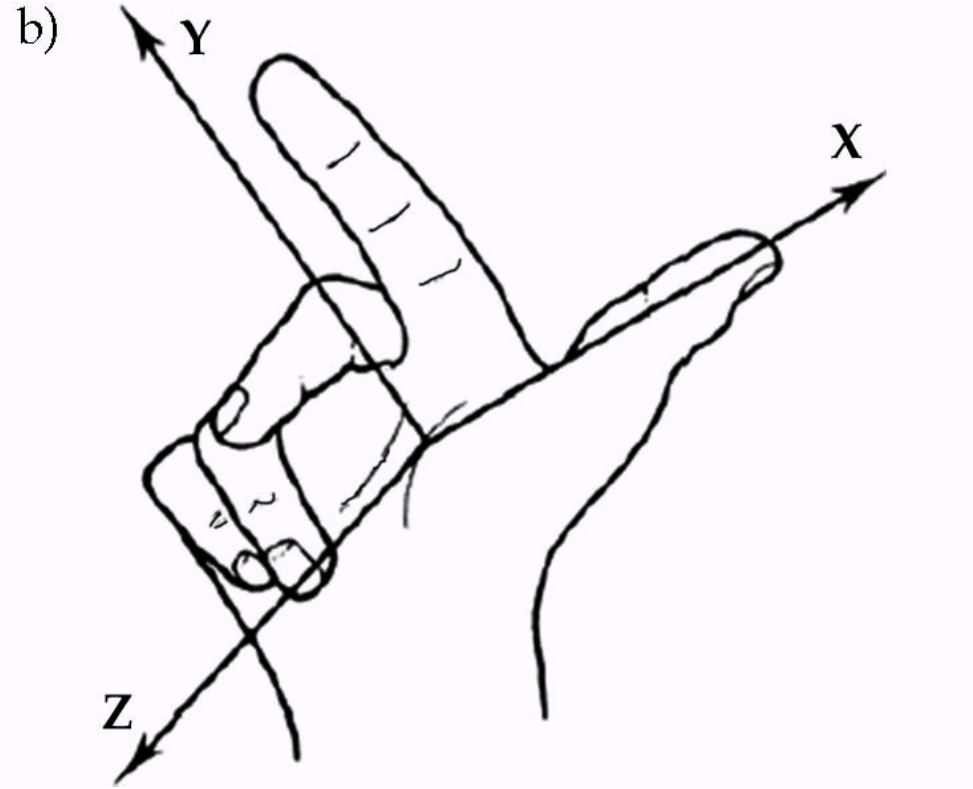
Układy współrzędnych stosowane w przestrzeni 3D są kluczowe dla tworzenia modeli trójwymiarowych. Aby efektywnie używać wielu

dostępnych narzędzi przeznaczonych do modelowania, edycji, wyświetlania i wizualizacji obiektów trójwymiarowych, należy uwzględnić różne położenia modelu 3D w przestrzeni trójwymiarowej (w trakcie modelowania najczęściej oprócz jednego układu globalnego wykorzystuje się pewną liczbę zdefiniowanych wcześniej przez użytkownika układów lokalnych, przełączając się pomiędzy nimi w trakcie modelowania). Najczęściej do budowy trójwymiarowego modelu cyfrowego wykorzystywany jest **prawoskrętny układ współrzędnych prostokątnych** (rys. 20a). Taki układ podlega tzw. regule prawej dłoni, której ideę przedstawia rysunek 20b (kciuk wskazuje dodatni kierunek osi X, palec wskazujący – dodatni kierunek osi Y, palec środkowy – dodatni kierunek osi Z).

a)



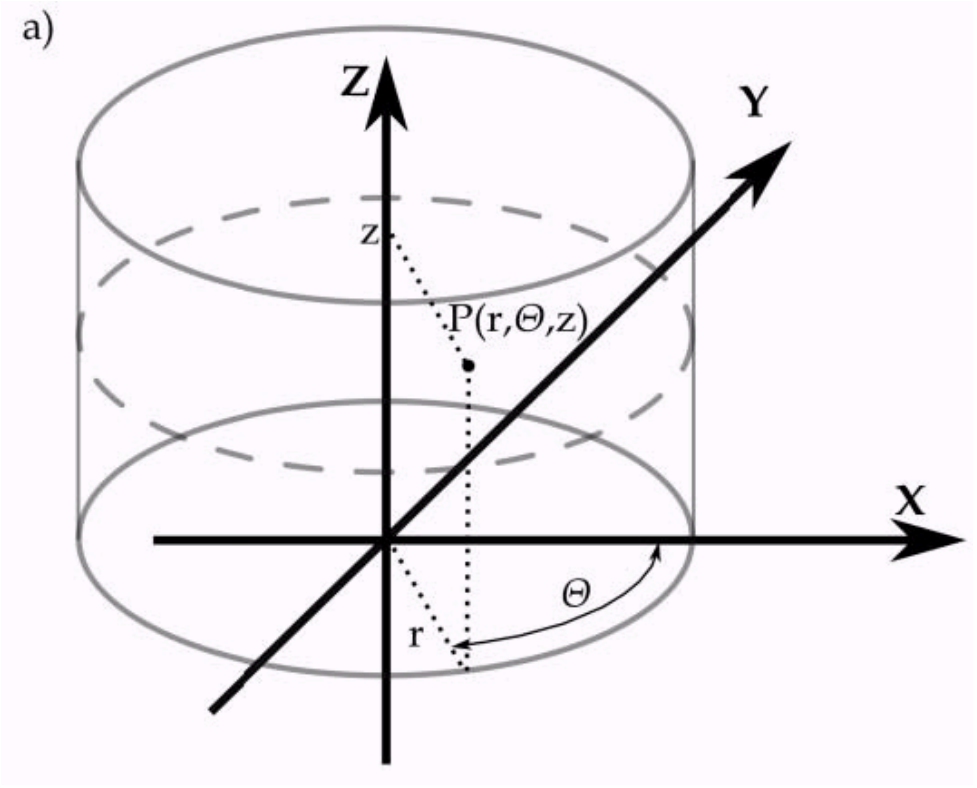
b)

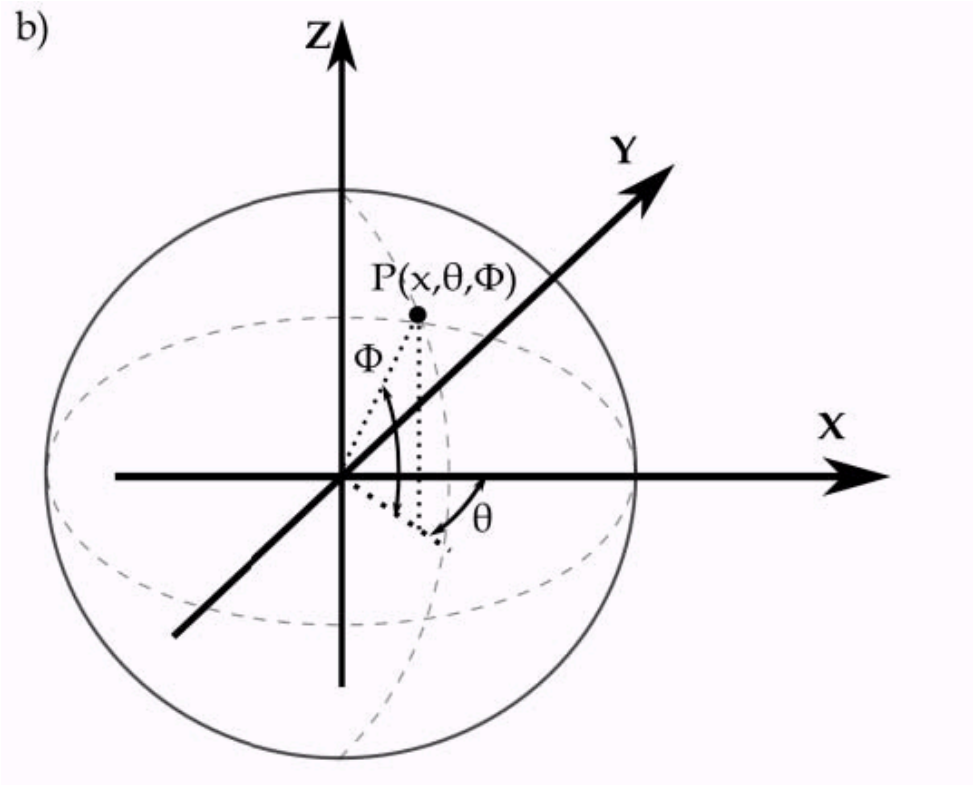


Rysunek 20. Prawoskrętny prostokątny układ współrzędnych stosowany w przestrzeni: a) układ osi, b) reguła prawej dłoni

Zapis **współrzędnych walcowych** jest podobny do zapisu dwuwymiarowych współrzędnych biegunowych, ale zapis ten uwzględnia dodatkową odległość od prostopadłej współrzędnej biegunowej do płaszczyzny XY. We współrzędnych cylindrycznych punkt jest lokalizowany przez określenie jego odległości wzdłuż promienia *r*, kąta *Θ* względem osi X oraz współrzędnej Z (rys. 21a). Współrzędne cylindryczne bezwzględne 4<30,6 definiują na przykład punkt znajdujący się cztery jednostki od początku układu współrzędnych pod kątem 30 do osi X (leżącym na płaszczyźnie XY) i sześć jednostek wzdłuż osi Z.

Zapis **współrzędnych sferycznych** przedstawiony na rysunku 21b jest nieco podobny do zapisu współrzędnych biegunowych 2D. W tym układzie punkt jest lokalizowany przez podanie jego odległości *r* od początku układu współrzędnych „O", kąta z osią X (w płaszczyźnie XY) oraz kąta od płaszczyzny XY. Współrzędnymi są: promień wodzący r, azymut *Θ* i wysokość kątowa *Φ*.


a)
Z
Y
X
z
P(r,Θ,z)
Θ
r


b)
Z
Y
X
P(x,θ,Φ)
Φ
θ

Rysunek 21. Przestrzenne układy współrzędnych: a) walcowy, b) sferyczny

Zestawienie opisywanych układów współrzędnych zawiera tabela 13.

Tabela 13. Porównanie układów współrzędnych stosowanych w CAD

Układ współrzędnych	**Składnia współrzędnych punktu**	**Składnia w skrócie**	**Przykład**
Kartezjański (2D)	([**odległość** wzdłuż osi X], [**odległość** wzdłuż osi Y])	(x,y)	(3,2) 3 mm, 2 mm
Biegunowy (2D)	([**promień** (odległość od osi Y)]. [**azymut** (kąt promienia z osią X)])	(r<Θ)	(3<30) 3 mm, 30°
Karteziański (3D)	([**odległość** wzdłuż osi X], [**odległość** wzdłuż osi Y], [**odległość** wzdłuż osi Z])	(x.y.z)	(-3,3,2) -3 mm, 3 mm, 2 mm
Walcowy (3D)	([**promień** (odległość od osi Z)]. [**azymut** (kąt płaszczyzny pion, przechodzącej przez punkt i początek układu z osią X)].	(r<Θ,z)	(5<30,6) 5 mm, 30°, 6 mm

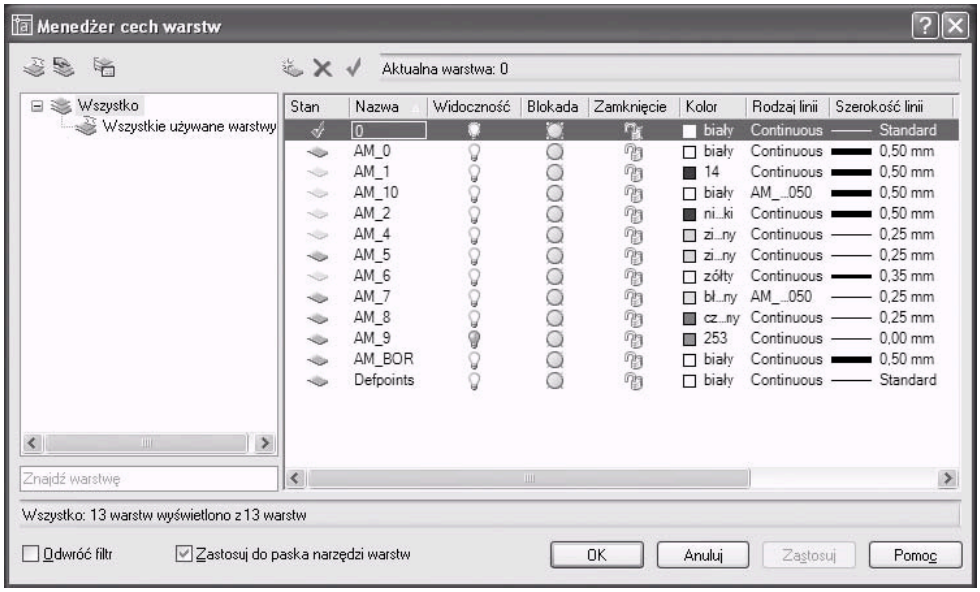
	[**wysokość** (odległość od płaszczyzny XY)])		
Sferyczny (3D)	([**promień** (odległość od początku układu)], [**azymut** (kąt płaszczyzny pion, przechodzącej przez punkt i początek układu z osią X)]. [**wysokość kątowa** (kąt względem płaszczyzny XY)])	(r<Θ<Φ)	(8<30<30) 8 mm, 30°, 30°

3.3. Warstwy

Dane geometryczne w systemach CAD/CAM tworzą strukturę składającą się z tzw. warstw. Zasadniczym celem ich zastosowania jest ułatwienie grupowania obiektów geometrycznych w modelu CAD. Warstwy umożliwiają logiczne oddzielenie różnych części modelu cyfrowego w sposób, w jaki życzy sobie tego użytkownik. Każda warstwa jest więc pewnego rodzaju zbiorem zorganizowanych logicznie danych w celu ich przetwarzania oraz udostępniania. Do warstw przypisane są atrybuty obiektu, np.: kolor, rodzaj linii (np. ciągła, przerywana, kropkowana itd.), indywidualny współczynnik skali linii, styl wydruku, szerokość linii itp. W poszczególnych warstwach zwykle umieszcza się obiekty powiązane ze sobą konstrukcyjnie lub funkcjonalnie. Widoczność wybranych warstw można włączać i wyłączać, istnieje też opcja blokowania edycji wybranych warstw. Dzięki technice warstwowania jest możliwe

wyświetlenie tylko niektórych elementów geometrycznych, topologicznych i innych.

Współczesne oprogramowanie CAD najczęściej automatycznie definiuje warstwy w trakcie modelowania. Przykład utworzonego automatycznie układu warstw dla rysunku 2D przedstawia rysunek 22.



Rysunek 22. Układ automatycznie wygenerowanych warstw w AutoCAD Mechanical

Idea organizacji obiektów w warstwy była odpowiedzią na konieczność uzyskiwania czytelności na ekranie komputera i na plotowanych rysunkach. Zasadę organizacji warstw podporządkowano podstawowej zasadzie projektowania technicznego z zastosowaniem baz danych – logicznie zorganizowana informacja (poziom koncepcyjny) jest oddzielona od sposobu, w jaki tę informację koduje się w poszczególnych aplikacjach CAD.

Warstwy odgrywają kluczową rolę w przypadku importu i eksportu danych między systemami CAx (np. między modułem CAD a modułem CAM), w trakcie importu można wybrać poszczególne warstwy – nie ma konieczności importowania wszystkich danych. Sposób organizacji i systematykę nadawania nazw warstwom

określa norma PN-EN ISO 13567-1. Według zaleceń normy warstwom nadawane są niepowtarzające się nazwy, które mogą się składać z kilku cyfr lub długich mnemonicznych kodów alfanumerycznych.

Składnia nazw warstw jest znormalizowana jedynie w zastosowaniach CAD w architekturze i budownictwie.

3.4. Krzywe parametryczne

W modelerach CAD powierzchniowe obiekty 3D mogą być budowane z siatek wielokątów lub definiowane za pomocą krzywych parametrycznych. Siatka wielokątów ma tę przewagę, że łatwo można deformować obiekt (np. skręcać, wyginać), z kolei krzywe parametryczne w naturalny sposób tworzą gładkie powierzchnie. W CAD zastosowanie znajdują następujące krzywe parametryczne:

- krzywe trzeciego stopnia,
- krzywe sklejane (zwłaszcza typu NURBS[29]) – ciągłość C1 i C2 na łączeniach, aproksymacja),
- krzywe Hermite'a – dwa punkty i wektory styczne w tych punktach,
- krzywe Béziera – dwa punkty końcowe i dwa inne punkty definiujące styczne w punktach końcowych.

Specyficznym przypadkiem krzywej sklejanej jest splajn nazywany niejednorodną wymierną krzywą B-splajn (ang. *nonuniform rational B-spline* – NURBS). Krzywa typu NURBS to gładka krzywa między punktami sterującymi, która powstaje w wyniku określenia zbioru punktów. Krzywa może być zamknięta, tzn. punkt początkowy będzie równocześnie punktem końcowym oraz w punkcie tym zachowana będzie styczność krzywej. Tolerancja określa, jak bardzo splajn jest dopasowany do zbioru określonych punktów. Im mniejsza wartość tolerancji, tym dokładniej splajn pokrywa się z zadanymi punktami. Gdy tolerancja ma wartość zero, to splajn przechodzi

przez wszystkie punkty. W trakcie modelowania można dowolnie zmieniać tolerancję dopasowania splajnu.

Powierzchnia *B-spline* jest łatwa w modyfikacji, gdyż każdy biegun jej siatki kontrolnej wpływa na kształt powierzchni tylko w ograniczonym stopniu. Rysunki zawierające splajny zajmują mniej pamięci i miejsca na dysku niż rysunki zawierające polilinie dopasowane do splajnu o podobnym kształcie. Za pomocą polecenia SPLAJN można łatwo przekształcić polilinie dopasowane do splajnu w prawdziwe krzywe typu splajn.

3.5. Rodzaje modeli cyfrowych stosowanych w CAD

3.5.1. Klasyfikacja modeli cyfrowych

Szczegóły definicji kształtu tej samej części (o takich samych wymiarach i kształcie) w różnych programach CAD mogą być bardzo różne, ponieważ:

- algorytm zapisu danych (rodzaj pliku) oraz rodzaj zastosowanego modelu (np. bryłowy, powierzchniowy czy hybrydowy) zależą od możliwości oferowanych przez konkretne oprogramowanie. Nawet w tym samym systemie CAD mogą być dostępne różne metody modelowania cyfrowego oraz możliwości dołączania informacji dodatkowych (np. historii modelowania),
- stopień uszczegółowienia modelu zależy od jego przeznaczenia w procesie projektowym. Przykładowo uproszczony geometrycznie model części może być zastosowany do obliczeń wytrzymałościowych MES[30] lub do analizy potencjalnych kolizji przestrzennych oraz wykonania prezentacji fotorealistycznej, natomiast wersja ze wszystkimi szczegółami

konstrukcyjnymi może być zastosowana w procesie generowania dokumentacji wykonawczej.

Dwa modele przestrzenne wykonane w różnych systemach CAD zwykle mają diametralnie inną strukturę (topologię) i w związku z tym różnią się znacznie m.in. możliwościami zastosowania jako model do obliczeń wytrzymałościowych i analiz oraz jako podstawa do opracowania procesu obróbki w systemie CAM. Różnią się także możliwościami modyfikacji geometrii. W związku z tym nie można odpowiedzialnie stwierdzić, że w każdym systemie CAD można zdefiniować każdy model, o tych samych walorach utylitarnych wymaganych na różnych etapach projektowania. Nawet jeśli w dwóch systemach można uzyskać cyfrowy obiekt geometryczny (o identycznych wymiarach), to czas jego tworzenia związany z możliwością automatyzacji typowych zadań oraz jego topologia i wynikająca z niej podatność modelu na wprowadzanie nieuniknionych w procesie projektowania zmian konstrukcyjnych mogą od siebie znacznie odbiegać.

Istnieje kilka rodzajów modeli cyfrowych:

- modele krawędziowe (ang. *wire – frame models*),
- modele powierzchniowe (ang. *surface models*),
- modele bryłowe CSG (ang. *solid models* lub *Constructive Solid Geometry models*[31]),
- modele bryłowe B-rep (ang. *Boundary Representation*[32]),
- modele hybrydowe, np. CSG+B-rep (zwłaszcza uzyskane metodą FBM[33]), rzadziej połączenie modeli krawędziowych z powierzchniowymi lub bryłowych z powierzchniowymi.
- modele fraktalne (od łac. *fractus*) – modele wykorzystujące samopodobieństwo obiektów,
- modele złożone z wokseli[34] (ang. *voxel models*).

Wymienione modele różnią się miedzy sobą strukturą (patrz tabela 14).

Tabela 14. Charakterystyka podstawowych modeli cyfrowych

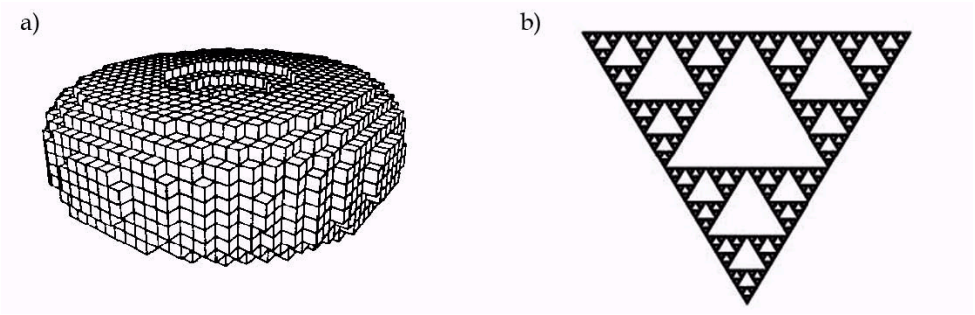
L.p.	Rodzaj modelu	Struktura modelu
1	Krawędziowy	Punkty + linie (odcinki, splajny, okręgi itp.)
2	Powierzchniowy	Powierzchnie (np. NURBS, Beziera lub Hermitte'a)
3	Bryłowy CSG	Prymitywy objętościowe + drzewo strukturalne
4	Bryłowy B-rep	Zamknięte powierzchnie graniczne + wnętrze + drzewo strukturalne
5	Bryłowy hybrydowy	Bryłowy CSG + bryłowy B-rep uzyskany metodą FBM (Features Based Modeling). Prymitywy objętościowe + elementy (geometria elementów opisana parametrami skojarzonymi z tablicą ich wartości liczbowych) + drzewo strukturalne modelu
		Bryłowy CSG + bryłowy B-rep uzyskany metodą przesuwania i obracania obiektów 2D (obiekt 3D jest budowany przez zakreślanie przestrzeni)
6	Fraktalny	Wykorzystuje się samopodobieństwo dokładne (wierna kopia powiększonego lub pomniejszonego fragmentu) lub samopodobieństwo statystyczne (fraktale losowe)
7	Bryłowy wokselowy	Przestrzeń opisana trójwymiarowym rastrem (siatką wypełnioną wokselami, których grupy tworzą obiekty 3D)

Pięć pierwszych z wyżej wymienionych siedmiu typów modeli cyfrowych ma zastosowanie w CAD (krawędziowy, powierzchniowy, CSG, B-rep oraz hybrydowy), scharakteryzowano je poniżej.

Modele krawędziowe zostały scharakteryzowane w podpunkcie 3.5.2; **modele i modelowanie powierzchniowe** opisano szerzej

w podpunkcie 3.5.2; **modele i modelowanie bryłowe (CSG)** (oparte na prymitywach objętościowych) opisano w podpunkcie 3.5.4; **modele bryłowe B-rep** (zbudowane z powierzchni granicznych i znajdującej się wewnątrz „zamkniętej" objętości) zostały opisane w podpunkcie 3.5.5; **modele oparte na cechach konstrukcyjnych (FBM)** opisano szerzej w podpunkcie 3.5.5.

Przykłady modelu złożonego z wokseli oraz modelu fraktalnego przedstawia rysunek 23. Istotnym parametrem modelu wokselowego przedstawionego na rysunku 23a jest jego rozdzielczość, czyli rozmiar woksela. W praktyce, np. w przypadku obrazu uzyskanego z tomografu, wymiar woksela może wynosić 5 –10 μm. Modele fraktalne (rys. 23b) zbudowane są z elementów samopodobnych i w związku z tym ich rozdzielczość jest nieskończona.



Rysunek 23. Modele cyfrowe: a) z wokseli, b) fraktalny

Należy pamiętać, że **rodzaj modelu nie ma nic wspólnego ze sposobem wyświetlania danego modelu** na ekranie komputera. Zarówno model powierzchniowy, jak i bryłowy mogą być wyświetlone jako model krawędziowy, co nie znaczy, że są tego typu modelem.

W zależności od rodzaju wykonywanych czynności można wyróżnić modelowanie cyfrowe polegające na:

- wykonywaniu dwuwymiarowych rysunków płaskich (sporządzanie klasycznej dokumentacji technicznej z wykorzystaniem komputera jako „elektronicznej deski kreślarskiej"); w tego typu podejściu stosuje się biblioteki elementów znormalizowanych, zdefiniowane wcześniej bloki

pogrupowanych obiektów oraz pewne funkcje automatyzujące rysowanie, np. automatyczne kreskowanie wskazanych przekrojów, automatyczne wymiarowanie itp.;

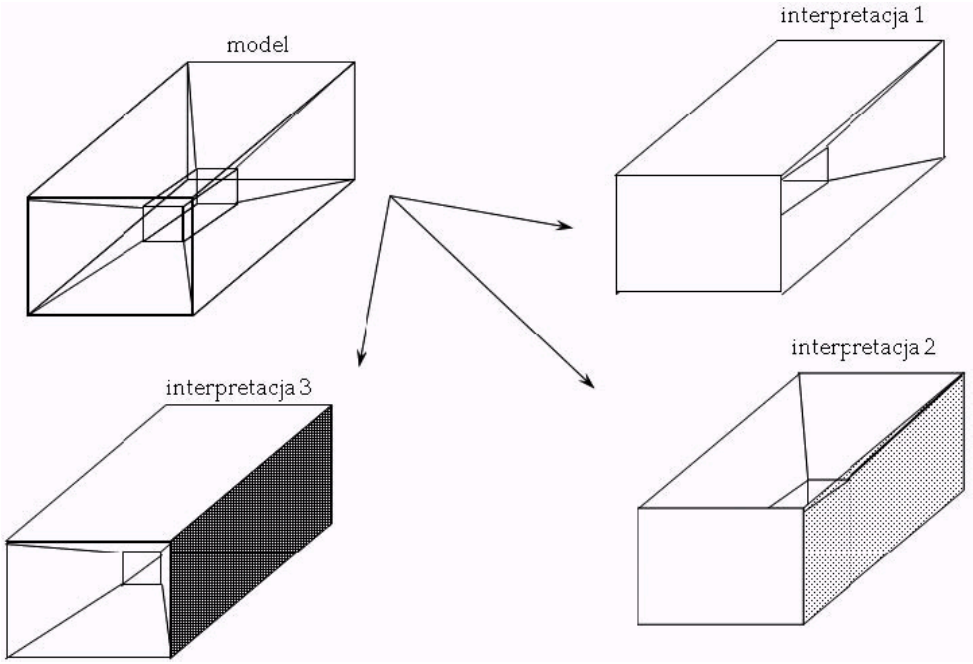
- wykonywaniu modeli krawędziowych – w bardzo nielicznych przypadkach istnieje konieczność wykonania modelu krawędziowego; np. w sytuacji, kiedy model jest przeznaczony do wykonania obliczeń wytrzymałościowych – model krawędziowy np. ustroju kratowego wykonany w oprogramowaniu CAD eksportuje się w uniwersalnym formacie wymiany danych do oprogramowania umożliwiającego wykonanie obliczeń;
- wykonywaniu modeli powierzchniowych – tego typu modele umożliwiają uzyskanie obiektów o dość złożonych kształtach, niemożliwych do uzyskania przez zastosowanie modeli bryłowych – szerzej w podpunkcie 3.5.2;
- wykonywaniu modeli bryłowych metodą CSG z zastosowaniem tzw. prymitywów objętościowych – ta technika została szerzej opisana w podpunkcie 3.5.4;
- wykonywaniu modeli bryłowych B-rep;
- wykonywaniu modeli hybrydowych (B-rep i CSG) najczęściej techniką modelowania opartą na cechach konstrukcyjnych (ang. *feature based modeling*) – ta technika została szerzej opisana w podpunkcie 3.5.5.

3.5.2. Modele krawędziowe

Modele krawędziowe są uproszczonym przedstawieniem obiektu 3D wyłącznie za pomocą linii i punktów. Krawędziami mogą być odcinki linii prostych, okręgi, elipsy, łuki lub krzywe (np. NURBS, Béziera lub Hermitte'a). Modele szkieletowe nie zawierają informacji o powierzchni bocznej bryły ani tym bardziej o jej wnętrzu. Dzięki swej prostocie modele szkieletowe umożliwiają szybkie tworzenie obiektów 3D o wymaganych kształtach i mogą być stosowane w fazie wstępnej definiowania bryły. Głównymi cechami modeli

krawędziowych są: (1) bardzo prosta struktura (małe wymagania sprzętowe), (2) niejednoznaczne przedstawienie obiektu (rys. 24), (3) ograniczona przydatność, (4) łatwość eksportu pomiędzy różnymi systemami CAD.

Modele krawędziowe mogą być niejednoznaczne w interpretacji, co przedstawia rysunek 24.

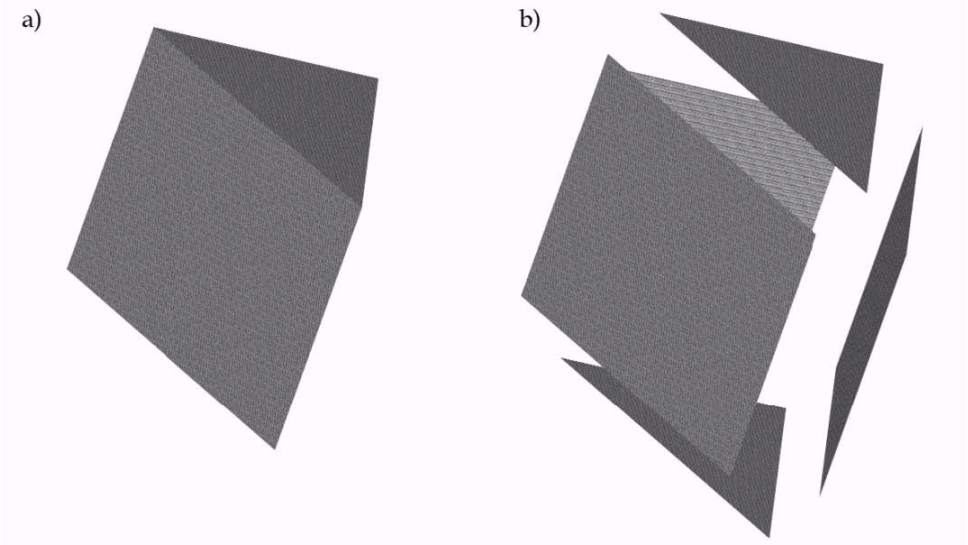


Rysunek 24. Niejednoznaczność modelu krawędziowego

Specyficznym przypadkiem modelu krawędziowego jest szkic 2D lub 3D. Szkice 2D (wykonane na płaszczyźnie konstrukcyjnej) są początkowym etapem modelowania opartego na elementach (opisanego szerzej w podpunkcie 3.5.5) i służą do tworzenia brył. Szkice 3D powstają przez połączenie punktów w przestrzeni i podobnie jak szkice 2D, są podstawą do wykonywania dalszych operacji modelowania. Szkic 3D umożliwia utworzenie mapy dla elementów wyciągnięcia 3D, takich jak odrutowania, okablowania, orurowania, konstrukcje ramowe oraz kratownicowe.

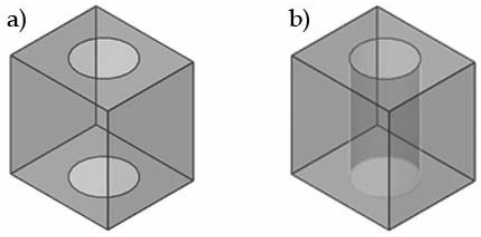
3.5.3. Modele powierzchniowe

Modele powierzchniowe są tworzone z elementarnych powierzchni ograniczonych krawędziami. Wyróżnikami modelowania powierzchniowego są m.in. możliwość definiowania bardzo skomplikowanych postaci powierzchni modeli (szczególnie powierzchni niewystępujących na podstawowych bryłach geometrycznych, takich jak: prostopadłościany, kule, walce, ostrosłupy itp.) oraz brak „wnętrza" modelu, a co za tym idzie – cech tworzywowych (masa, gęstość, środek ciężkości, momenty bezwładności itp.).



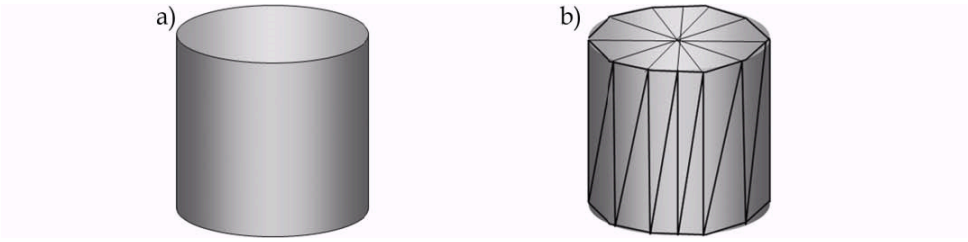
Rysunek 25. Idea modelu powierzchniowego: a) model powierzchniowy klina, b) widok rozstrzelony

Walcowy otwór przelotowy wykonany w modelu powierzchniowym ma postać dwóch okręgów (rys. 26a); taki sam otwór w modelu bryłowym jest powierzchnią walcową (rys. 26b).



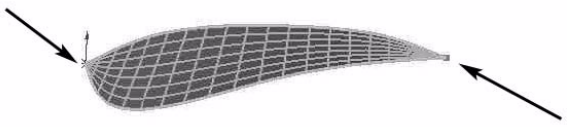
Rysunek 26. Porównanie modelu powierzchniowego z bryłowym

W większości zastosowań do opisania powierzchni wykorzystuje się reprezentację wielokątową, tzn. powierzchnie boczne modelowanych brył są opisywane za pomocą zbioru wielokątów. W przypadku obiektów o kształcie wielościanów reprezentacja ta jest w pełni naturalna. W przypadku gdy powierzchnie boczne nie są płaskie, dokonuje się aproksymacji wielokątowej tych powierzchni (np. rys. 27) lub opisuje się za pomocą odpowiednich powierzchni krzywoliniowych (np. powierzchni Béziera albo powierzchni NURBS (nonuniform rational B-splines).



Rysunek 27. Reprezentacja wielokątowa powierzchni: a) obiekt przed triangulacją, b) obiekt triangulowany

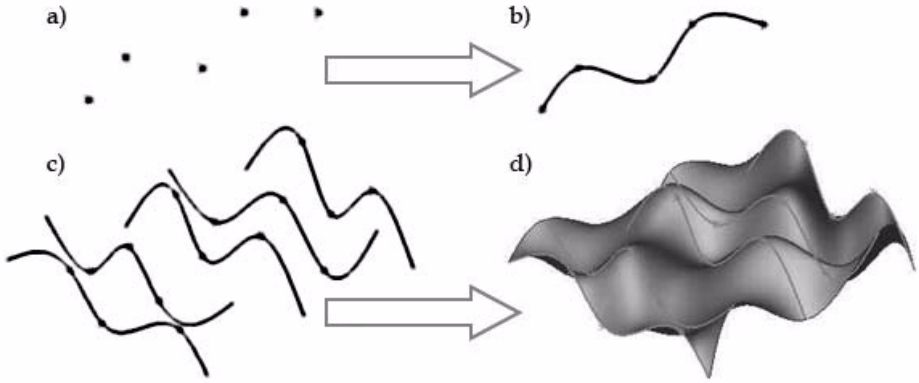
Szeroko stosowane w CAD powierzchnie typu NURBS zawsze mają cztery krawędzie. Powierzchnie trzy- lub dwukrawędziowe mają zdefiniowane brakujące powierzchnie o zerowej długości (tego typu elementy powierzchniowe zdegenerowane są niezalecane do stosowania, ponieważ mogą sprawić problemy podczas eksportu do innych programów CAD/CAM; pojawiają się również problemy podczas skalowania i odsuwania tego typu obiektów). Przykład płata powierzchni zdegenerowanej przedstawia rysunek 28, na którym przedstawiono przykład powierzchni dwukrawędziowej z zaznaczonymi strzałkami dwoma powierzchniami o zerowej długości.



Rysunek 28. Płat powierzchni zdegenerowanej

Przykładowy proces tworzenia płata powierzchni przedstawia rysunek 29.

W oprogramowaniu CAD powierzchnie są zwykle wykonywane dwoma sposobami. (1) Na podstawie krzywych konstrukcyjnych, które są wyciągane (ang. *swept*) lub rozpinane pomiędzy przekrojami (ang. *loft*). Modelery to między innymi: powierzchnie prostokreślne, powierzchnie prowadzone przez krzywe, powierzchnie typu swept (tworzone przez przesuwanie krzywych), powierzchnie stożkowe, powierzchnie służące do łączenia istniejących powierzchni (bridge, który zapewnia tworzenie gładkich przejść łączących przerwy między powierzchniami), powierzchnie służące do zamykania otworów (n-sided). (2) Gdy powierzchnia może zostać utworzona z połączenia szeregu dopasowanych do siebie płatów powierzchni, mówimy o tzw. modelowaniu bezpośrednim (ang. *Direct Shape Modeling* lub *Freeform Modeling*). Modelowanie bezpośrednie oznacza możliwość definiowania relatywnie prostych, mało skomplikowanych powierzchni cząstkowych, z których budowana jest całkowita bardzo złożona powierzchnia zewnętrzna. Modelowanie bezpośrednie łączy zazwyczaj dwie techniki modelowania – bryłową i powierzchniową, umożliwia projektowanie najbardziej skomplikowanych geometrycznie powierzchni. Istotą tej techniki jest bezpośredni dostęp do parametrów modelu matematycznego tej powierzchni, czyli parametrów równania interpolującego powierzchnię i/lub współrzędnych wierzchołków sieci kontrolnej tej powierzchni.



Rysunek 29. Tworzenie elementarnych powierzchni typu NURBS: a) punkty, b) splajn, c) grupa splajnów, d) powierzchnia typu NURBS

Modelowanie powierzchniowe Direct Shape Modeling daje także możliwość rozpinania powierzchni dopasowanej z zadaną dokładnością do siatki krzywych lub zbioru (tzw. chmury) punktów uzyskanych ze skanera 3D. Modele powierzchni mogą być korygowane przez modyfikowanie linii definiujących te powierzchnie, zmienianie wartości liczbowych parametrów lub zależności sterujących, np. zmiennym promieniem zaokrąglenia lub zmianą współrzędnych i wag punktów korygujących.

Modelowanie powierzchniowe na podstawie krzywych konstrukcyjnych jest możliwe do zrealizowania w każdym współczesnym programie CAD, modelowanie powierzchniowe metodą Direct Shape Modeling umożliwiają niektóre modelery średniego poziomu[35] (np. SolidWorks) oraz wszystkie modelery najwyższego poziomu (np. CATIA, NX, Pro/E).

Topologicznie poprawny model powierzchni zewnętrznej części umożliwia analizę właściwości geometrycznych modelu przestrzennego części (pole powierzchni, objętość), zdefiniowanie bryły ograniczonej tą powierzchnią, generowanie widoków i przekrojów na rysunkach wykonawczych i złożeniowych, definiowanie siatki elementów skończonych i analizę wytrzymałościową modelu, analizy przestrzenne i kinematyczne w kontekście innych części wyrobu oraz definiowanie technologii obróbki na obrabiarkach CNC. Przydatność modelu końcowego jest bezpośrednio zależna od tego, jak użytkownik systemu CAD

zdefiniował jego powierzchnie cząstkowe oraz jak te powierzchnie są ze sobą połączone. Z tego powodu proces definiowania powierzchni musi być często powtarzany (przynajmniej częściowo) aż do momentu, gdy model końcowy spełnia wszystkie wymagania konstrukcyjne i technologiczne.

Najważniejszym wymaganiem stawianym modelowi powierzchniowemu jest wymóg, aby był zamknięty.

3.5.4. Modele z prymitywów objętościowych (CSG)

Cyfrowe obiekty, płaskie i przestrzenne, mogą być zbudowane z tzw. prymitywów. Pojęcie „prymityw" (ang. *primitive*) nawiązuje do pojęcia pochodzącego z klasycznej geometrii euklidesowej oznaczającego obiekt pierwotny. Modelowanie z zastosowaniem prymitywów jest najstarszą metodą modelowania cyfrowego stosowaną w CAD. Bryła wynikowa (model CAD) stanowi rezultat operacji logicznych (suma, różnica, część wspólna) na tzw. prymitywach objętościowych. Podstawowe prymitywy stosowane w CAD to:

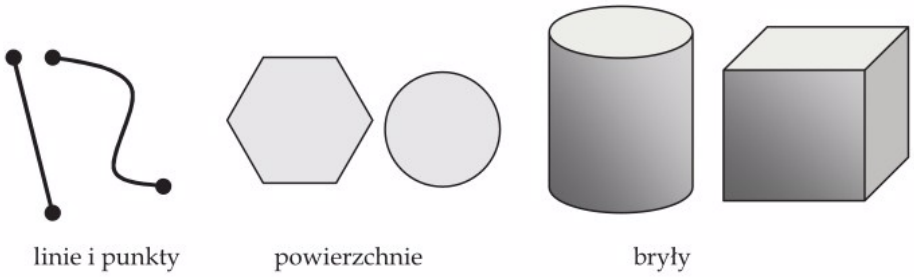
1. Na płaszczyźnie (2D):
    - punkt,
    - linia (prosta, półprosta, odcinek),
    - splajn,
    - łuk,
    - okrąg i elipsa, wielokąty foremne opisane i wpisane w okrąg,
    - trójkąt i prostokąt,
    - płaszczyzna 2D (różne kształty).
2. W przestrzeni trójwymiarowej (3D) – wszystkie uprzednio wymienione oraz dodatkowo:
    - płaszczyzna 3D (sfera, czasza kulista, torus[36], powierzchnia swobodna itp.),
    - prostopadłościan (rys. 31a),
    - kula (rys. 31b),

- walec (rys. 31c),
- stożek (rys. 31d),
- klin (rys. 31e)
- toroid[37] (rys. 31f),
- ostrosłup.

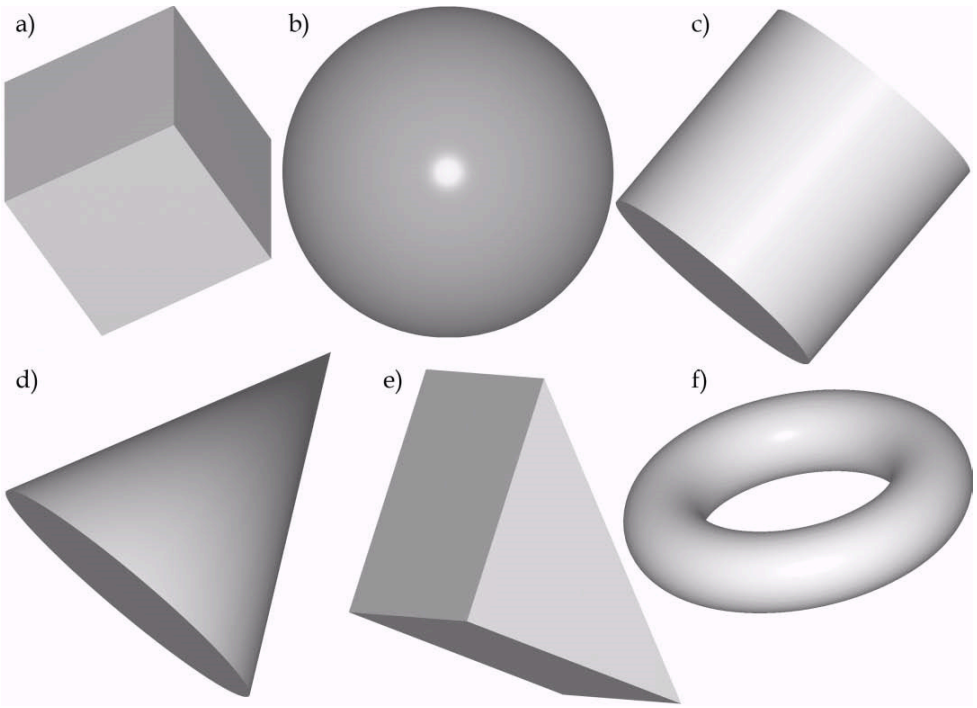
Wybrane prymitywy podzielone na trzy główne grupy przedstawiono na rysunku 30.

Prymitywy trójwymiarowe (bryły) częściej stosowane w modelowaniu bryłowym zamieszczono na rysunku 31.

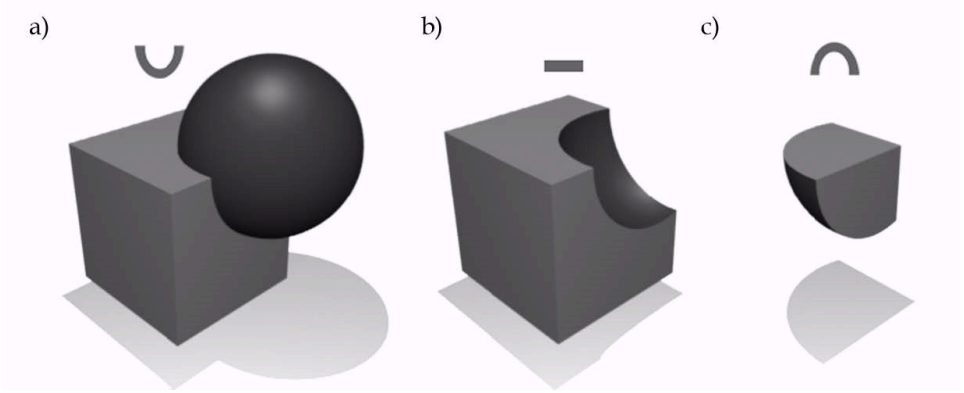
Prymitywy w metodzie CSG są przekształcane w złożone obiekty za pomocą tzw. operacji boole'owskich, które odpowiadają typowym działaniom na zbiorach tj.: sumie, różnicy oraz iloczynowi (części wspólnej).



Rysunek 30. Grupy prymitywów

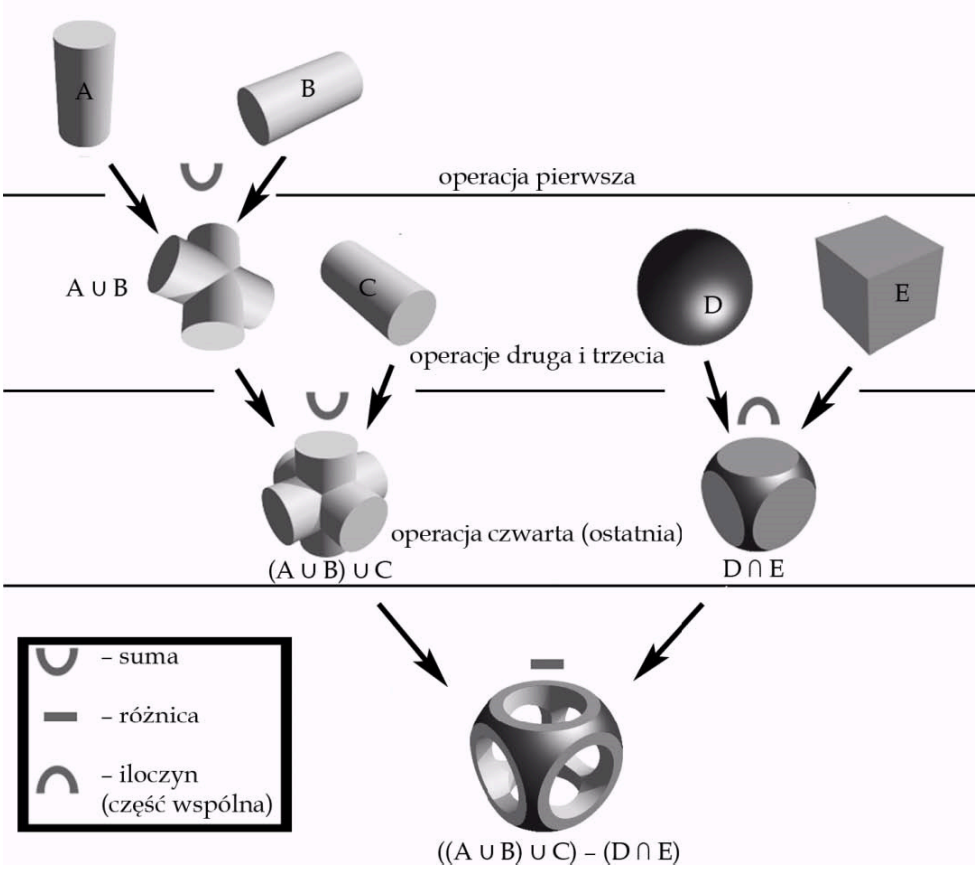


Rysunek 31. Wybrane prymitywy trójwymiarowe: a) prostopadłościan, b) kula, c) walec, d) stożek, e) klin, f) toroid



Rysunek 32. Podstawowe operacje algebry Boole'a: a) suma, b) różnica, c) iloczyn (część wspólna)

Przykład zastosowania operacji Boole'a do utworzenia dość złożonego obiektu z prymitywów objętościowych przedstawia rysunek 33.



Rysunek 33. Przykład zastosowania operacji Boole'a

Wyniki przeprowadzonych operacji oraz powiązane z nimi prymitywy lub ich zbiory można wyświetlić w postaci drzewa (węzły reprezentują operacje logiczne). Aby jednoznacznie zdefiniować model cyfrowy uzyskany metodą CSG, trzeba określić, z jakich prymitywów go zbudowano, oraz podać drzewo operacji koniecznych do uzyskania obiektu.

Zaletą metody CSG jest prostota obliczeń i operacji logicznych. Wadę stanowi brak możliwości uzyskania powierzchni swobodnych (ang. *free-form*).

3.5.5. Modele bryłowe B-rep

Modele bryłowe B-rep zbudowane są z objętości ograniczonych tzw. powierzchniami granicznymi. Przestrzenny obiekt cyfrowy jest zdefiniowany za pomocą opisu jego brzegu, czyli zbioru powierzchni ograniczających obiekt. Oprócz informacji geometrycznych, takich jak linie, punkty itd., wykorzystuje informacje topologiczne opisujące powiązania elementów składowych najniższego rzędu (wierzchołków, krawędzi, ścian, pętli). Model B-rep musi spełnić określone warunki topologiczne:

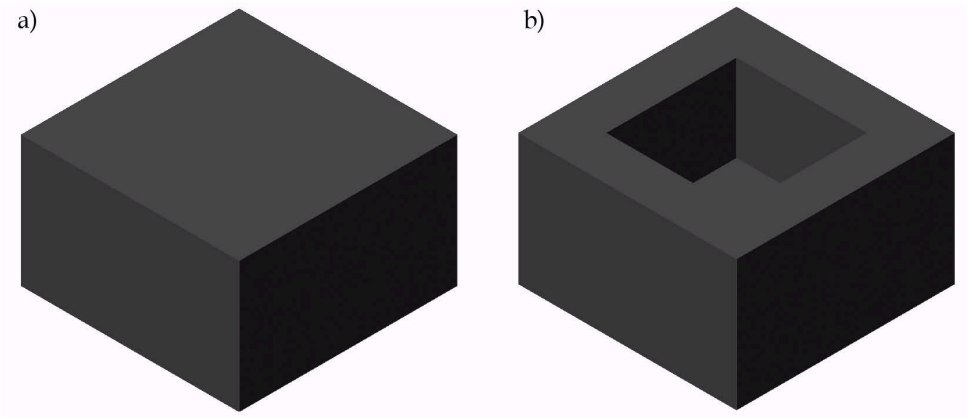
- zgadzać się z równaniem Eulera-Poincaré,
- powierzchnie graniczne są ograniczone zamkniętą krzywą (tzw. pętlą),
- powierzchnie graniczne są orientowalne[38],
- każda krawędź należy dokładnie do dwóch powierzchni elementarnych,
- każda krawędź ma dwa wierzchołki,
- każdy wierzchołek należy do co najmniej trzech krawędzi.

Równanie Eulera-Poincaré opisuje relacje między: liczbą wierzchołków (*V*), krawędzi (*E*), ścian (*F*), pętli (*L*), otworów przechodzących przez bryłę (*G*) oraz przestrzeni wewnętrznych (*S*). Ma postać:

$$V - E + F - (L - F) - 2(S - G) = 0$$

Gdzie:
V – liczba wierzchołków (ang. *vertice*),
E – liczba krawędzi (ang. *edge*),
F – liczba ścian (ang. *face*),
L – liczba pętli (ang. *loop*),
S – liczba przestrzeni wewnętrznych (ang. *shell*). Przestrzeń wewnętrzna w sensie geometrycznym jest ograniczona przez rozmaitość, czyli zbiór punktów, których współrzędne spełniają pewien układ równań wielomianowych. Liczba S jest zawsze większa lub równa 1.
G – liczba otworów przechodzących przez bryłę (ang. *genus*). Przykładowo G = 0 dla punktu, linii i sfery; G = 1 dla torusa

i filiżanki z uchem; G = 2 dla przestrzennego modelu liczby 8 oraz litery B.



Rysunek 34. Modele B-rep: a) prostopadłościan, b) prostopadłościan z otworem

Prostopadłościan pokazany na rysunku 34a ma osiem wierzchołków ($V = 8$), dwanaście krawędzi ($E = 12$) i sześć ścian ($F = 6$); nie ma otworów ($G = 0$), a każda ściana ma jedną zewnętrzną pętlę ($L = F$). Prostopadłościan ma jedną przestrzeń wewnętrzną ($S = 1$). Spełnia zależność Eulera-Poincaré po wstawieniu do równania:

$$V - E + F - (L - F) - 2(S - G) = 8 - 12 + 6 - (6 - 6) - 2(1 - 0) = 0$$

Bryła pokazana na rysunku 34b ma szesnaście wierzchołków ($V = 16$), dwadzieścia cztery krawędzie ($E = 24$) i jedenaście ścian ($F = 11$); nie ma otworów przelotowych ($G = 0$) i ma dwanaście pętli ($L = 12$) (jedenaście zewnętrznych otaczających ściany i jedną pętlę wewnętrzną). Prostopadłościan ma jedną przestrzeń wewnętrzną ($S = 1$). Po wstawieniu do równania Eulera-Poincaré:

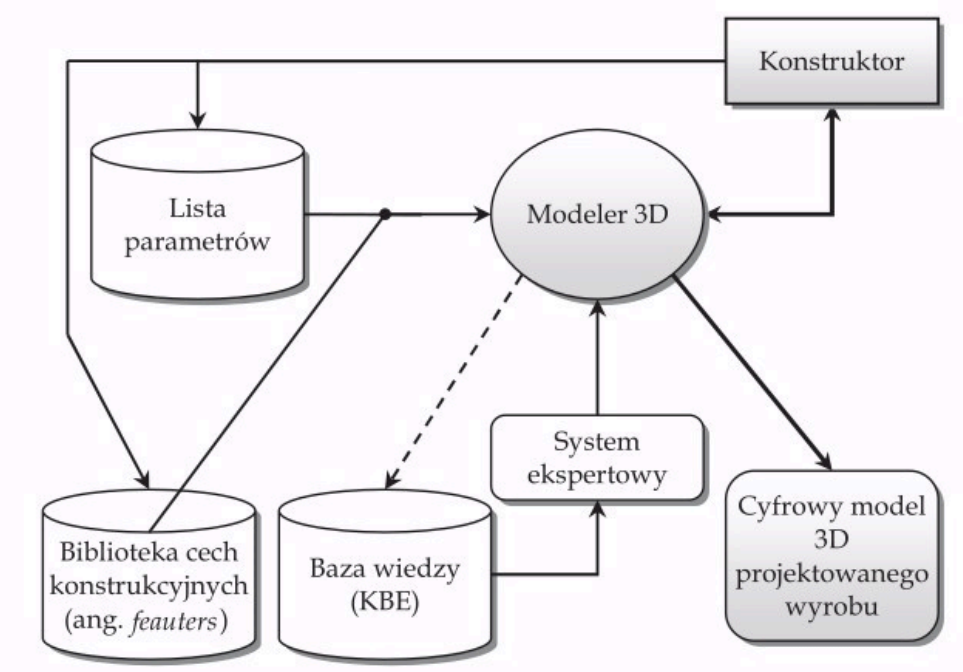
$$V - E + F - (L - F) - 2(S - G) = 16 - 24 + 11 - (12 - 11) - 2(1 - 0) = 0$$

Metoda B-rep zapewnia wykonywanie operacji na prymitywach (suma, różnica, część wspólna), jednak trwa to dłużej niż w CSG i przebiega w kilkuetapowym procesie.

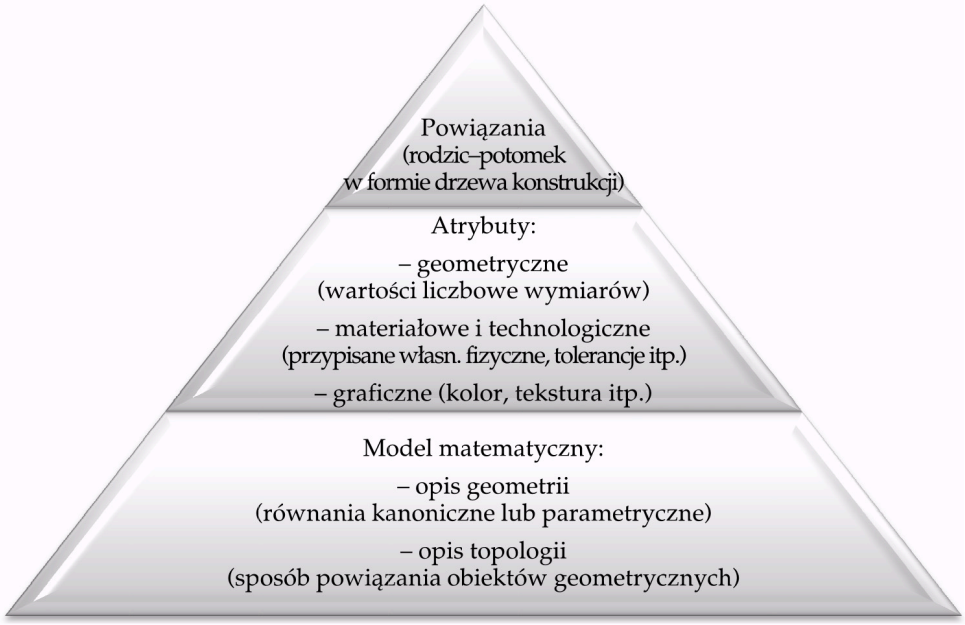
3.5.6. Modele oparte na cechach konstrukcyjnych (FBM)

Modelowanie oparte na cechach konstrukcyjnych bywa nazywane również modelowaniem wspomaganym elementami (ang. *Feature Based Modeling* – FBM, lub *feature-based design* – FBD). Nazwa metody FBM pochodzi od zastosowania tzw. cech konstrukcyjnych[39] (ang. *features*), z których każda ma określoną topologię i zestaw parametrycznych wymiarów geometrycznych. Program CAD umożliwiający modelowanie wspomagane cechami konstrukcyjnymi wykorzystuje zarówno modele przestrzenne CSG, jak i B-rep, oba zapisane w formie parametrycznej. Struktura przepływu informacji w oprogramowaniu CAD wykorzystującym bibliotekę cech konstrukcyjnych oraz system ekspertowy[40] w modelowaniu zostały przedstawione na rysunku 35. Modelowanie odbywa się przez: (1) bezpośrednie działanie w modelerze, (2) zmianę wartości parametrów lub (3) edytowanie biblioteki cech konstrukcyjnych.

We współczesnych systemach CAD bazujących na modelowaniu techniką FBM w trakcie tworzenia modelu dodatkowo wykorzystywany jest system ekspertowy oparty na bazie wiedzy. System ekspertowy wpływa na dobór wartości poszczególnych parametrów wybieranych przez konstruktora cech konstrukcyjnych, jego podstawowym celem jest weryfikacja poprawności technologicznej projektowanego wyrobu. Strukturę CAD-owskiej cechy konstrukcyjnej przedstawia rysunek 36.



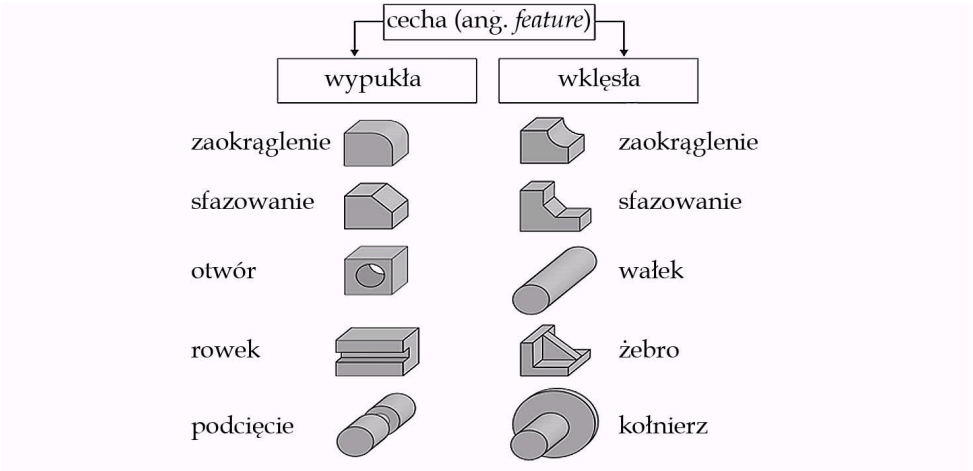
Rysunek 35. Struktura oprogramowania FBM



Rysunek 36. Struktura cechy konstrukcyjnej (ang. *feature*)

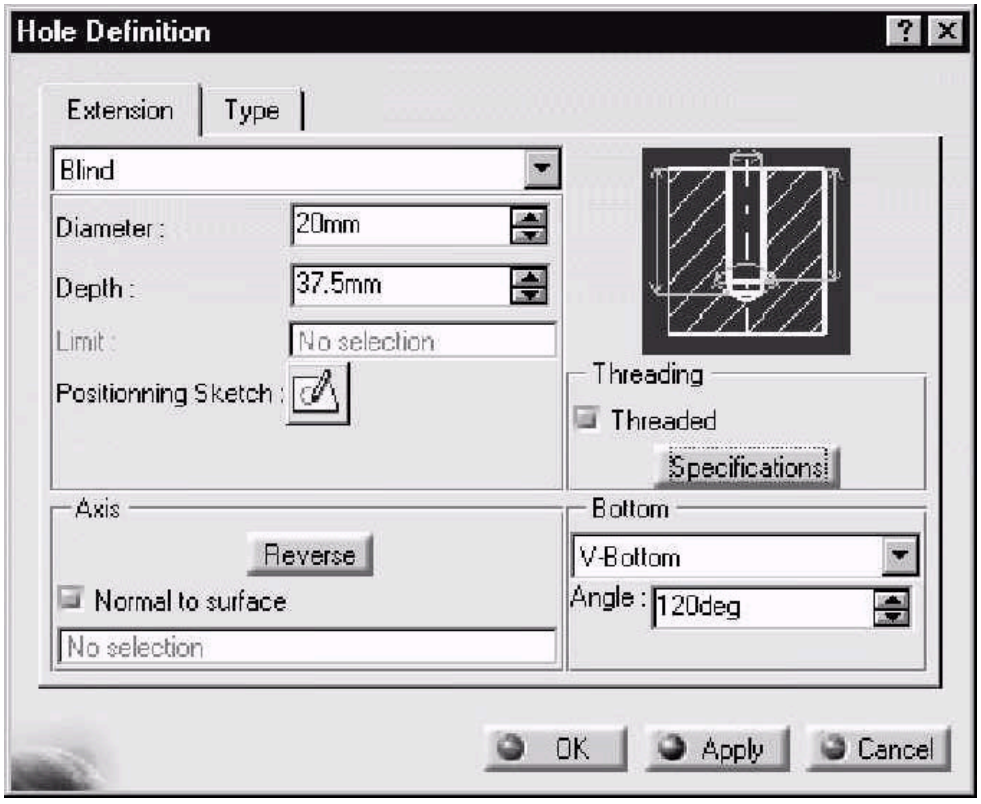
W praktyce FBM polega na zastosowaniu typowych, zebranych w bibliotekach kształtów geometrycznych opisanych przez charakterystyczne parametry i inne opcje do wyboru. Takimi

kształtami mogą być tzw. normalia oraz typowe kształty geometryczne. Przykładami normaliów mogą być części złączne, łożyska, pierścienie osadcze, pierścienie uszczelniające, wpusty, profile stalowe, koła zębate itp. Typowe kształty geometryczne to: otwory, podcięcia, rowki, zaokrąglenia, fazowania itp. Cechy zazwyczaj składają się z profilu definiującego przekształconego w trzeci wymiar przez wytłoczenie lub obrót. Metoda FBM oparta jest zatem na zastosowaniu dużej liczby predefiniowanych sparametryzowanych elementów, które są łączone w jedną wspólną strukturę o ścisłej hierarchii do utworzenia unikalnego obiektu. Przykłady cech konstrukcyjnych zamieszczono na rysunku 37.



Rysunek 37. Przykłady cech konstrukcyjnych

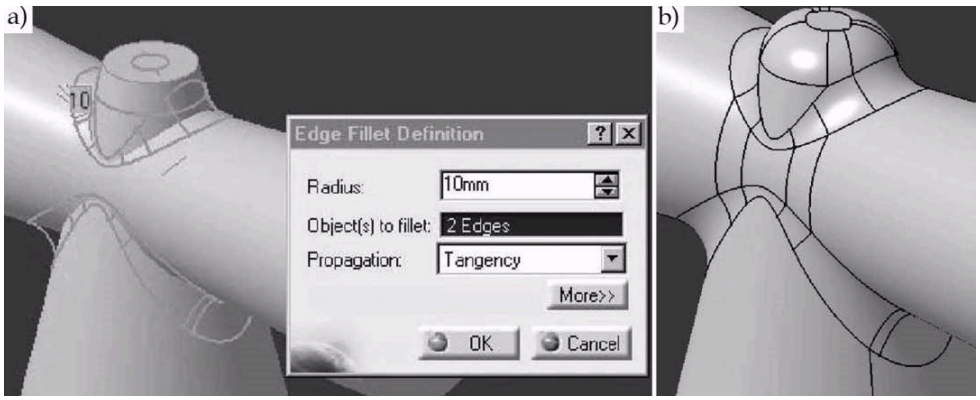
W praktyce w trakcie modelowania obiektu konstruktor wybiera typową cechę konstrukcyjną, podaje wejściowe parametry postaciowe oraz jej parametry wymiarowe. Przykład zastosowania tego typu cechy przedstawiono na rysunku 38.



Rysunek 38. Okno dialogowe do wykonywania otworów w programie CATIA V5R18

Rysunek 38 przedstawia przykładowe okno dialogowe do wykonania otworu ślepego o średnicy 20 mm i głębokości 37,5 mm, o dnie w kształcie części roboczej narzędzia do wykonywania otworów (wiertła o kącie wierzchołkowym 120). Oś symetrii otworu jest normalna do powierzchni.

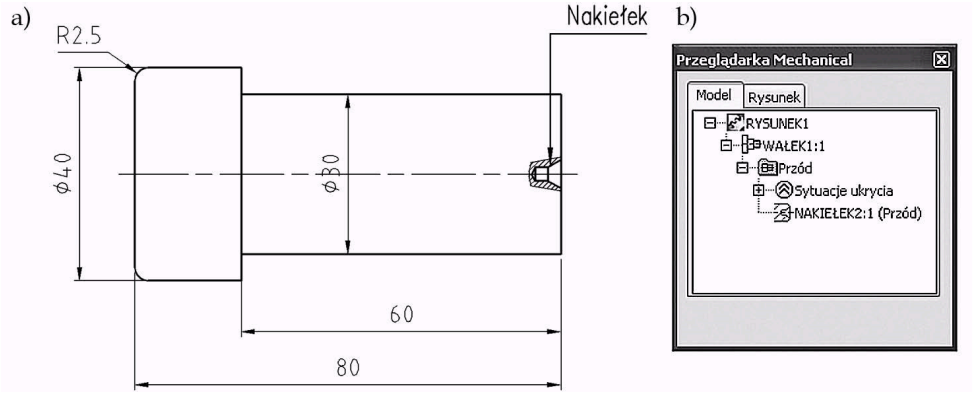
Jeżeli w modelu należy zdefiniować powierzchnię przejścia (ze stałym lub zmiennym promieniem) pomiędzy dwoma wskazanymi powierzchniami, to trzeba oczywiście wskazać te powierzchnie, ustalić wartość promienia, a operacja odcięcia niepotrzebnych części powierzchni zostanie wykonana automatycznie. Na rysunku 39 pokazano przykład wykonania przejścia promieniem 10 mm pomiędzy kilkoma stycznymi do siebie powierzchniami modelu bryłowego.



Rysunek 39. Wykonanie przejścia promieniem 10 mm pomiędzy stycznymi powierzchniami modelu bryłowego (CATIA V5R18): a) powierzchnie przed wykonaniem zaokrąglenia, b) powierzchnie po zaokrągleniu

Odpowiednie, wynikające ze specyfiki wybranej cechy konstrukcyjnej operacje Boole'a są w systemach opartych na FBM wykonywane automatycznie, a nie przez użytkownika, jak to ma miejsce w trakcie modelowania CSG. Dodatkowo, jeżeli projekt jest bardziej skomplikowany, to istnieje możliwość manualnego wykorzystania klasycznych operacji algebry Boole'a na przemian ze zautomatyzowanymi operacjami FBM.

Operacje oparte na cechach konstrukcyjnych możliwe są także w systemach służących do wykonywania płaskich rysunków konstrukcyjnych. Przykład zastosowania modelowania FBM w systemie Mechanical Desktop przedstawia rysunek 40.



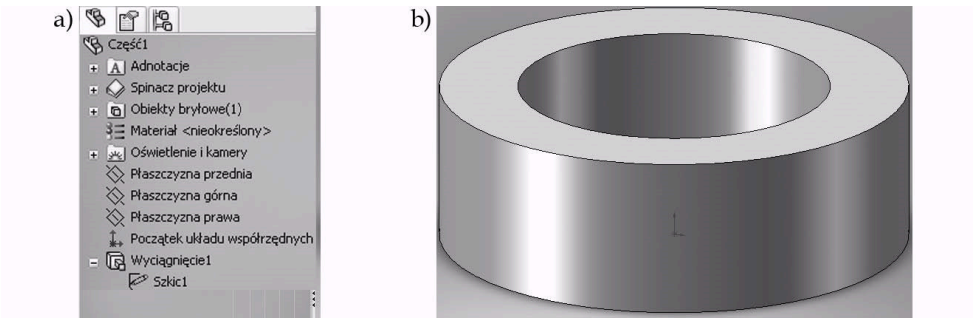
Rysunek 40. Przykład Feature Based Modeling w zastosowaniu do rysunku 2D (Autodesk Mechanical Desktop): a) model, b) drzewo konstrukcji

Na rysunku 40a przedstawiono wałek z wstawionym nakiełkiem, natomiast na rysunku 40b drzewo strukturalne modelu. Tego typu programy służące do wykonywania płaskich rysunków, a oparte na technice FBM bywają nazywane systemami 2,5D.

Features Based Modeling w porównaniu z modelowaniem z zastosowaniem prymitywów przyspiesza proces definiowania cyfrowego modelu części oraz przede wszystkim radykalnie upraszcza wprowadzanie zmian konstrukcyjnych. Model (płaski lub przestrzenny) części jest w systemie klasy Feature Based Design przedstawiany na dwa sposoby: klasycznie – jako bryła i/lub powierzchnia, oraz umownie – jako drzewo strukturalne modelu[41]. Przykład modelu oraz związanego z nim drzewa strukturalnego przedstawia rysunek 41. Przedstawiony model jest bardzo prosty, składa się ze szkicu (szkic1, rys. 41a) oraz wyciągnięcia (wyciągnięcie1). Struktura drzewa modelu wygląda następująco:

- Część1 – nazwa części.
- Adnotacje – dołączone do części oznaczenia oraz symbole (np. oznaczenia tolerancji wymiarowych).
- Spinacz projektu – dokument MS Word zawierający wszystkie niezbędne dodatkowe informacje o części.
- Obiekty bryłowe – obszar do zarządzania wszystkimi obiektami bryłowymi w modelu.

- Materiał – przypisane własności materiałowe (niezbędne do wyznaczenia podstawowych właściwości fizycznych, np. masy części).
- Oświetlenie i kamery – opcje wizualizacji.
- Płaszczyzna (przednia, górna, prawa) – podstawowe wbudowane płaszczyzny konstrukcyjne do umieszczania szkiców.



Rysunek 41. Struktura modelu (SolidWorks 2007): a) drzewo strukturalne modelu, b) model FBM

Poszczególne elementy modelu cyfrowego tworzą hierarchie macierzyste – pochodne, w której element macierzysty kontroluje własności elementu pochodnego. Może istnieć wiele poziomów takich powiązań. Jak można się domyślić, element pochodny „wstawiany” jest do elementu macierzystego i nie może bez niego istnieć (nakiełek przedstawiony na rysunku 40 nie może istnieć bez wałka). Każdy obiekt zdefiniowany w modelu może być powiązany z dowolną liczbą obiektów nadrzędnych oraz podrzędnych. Taka logiczna struktura powiązań ułatwia i wręcz umożliwia automatyczne odświeżenie modelu (Update) po każdej zmianie konstrukcyjnej. Co więcej, operacja Update nie oznacza ponownego przeliczenia całego modelu, ale (zazwyczaj) tylko tej cechy konstrukcyjnej, która została zmodyfikowana, oraz wszystkich zależnych od niej cech podrzędnych.

Drzewo strukturalne modelu, tzw. FeatureManager, znajdujące się zwykle po lewej stronie okna programu CAD może przedstawiać zarys widoku aktywnej części, złożenia lub rysunku. Ułatwia

poznanie sposobu skonstruowania modelu lub złożenia lub analizę różnych arkuszy i widoków w rysunku. Drzewo strukturalne modelu i obszar graficzny są ze sobą asocjatywnie połączone. W dowolnym z tych paneli można wybrać operacje, szkice, widoki rysunku i geometrie konstrukcyjne. Poruszając się po drzewie strukturalnym modelu, wystarczy przywołać procedurę definiowania wskazanej cechy konstrukcyjnej i zmienić wartość parametru lub dowolny z elementów wejściowych. Taka struktura systemu CAD jest podstawą każdego nowoczesnego systemu parametrycznego.

Drzewo strukturalne modelu umożliwia:

- Wybieranie do edycji elementów w modelu według nazwy.
- Identyfikowanie i zmianę kolejności, w której tworzone były operacje. Najczęściej można przeciągać elementy w drzewie strukturalnym modelu, aby zmienić kolejność, w jakiej operacje są regenerowane podczas przebudowywania modelu.
- Śledzenie historii modelowania.
- Nadawanie i zmienianie nazw elementów.
- Wygaszanie i przywracanie widoczności operacji, elementów i komponentów złożenia.
- Przeglądanie relacji rodzic – potomek.
- Wyświetlanie następujących elementów:
    1) opisy operacji,
    2) opisy komponentów,
    3) nazwy konfiguracji komponentów,
    4) opisy konfiguracji komponentów,
- Odnajdywanie błędów i ostrzeżeń związanych z modelem lub operacją.

Feature Based Modeling jest obecnie standardem we wszystkich dostępnych na rynku profesjonalnych systemach CAD. Najważniejszymi zaletami takiego rodzaju modelowania są szybkość tworzenia części i złożeń, łatwość poruszania się po strukturze skomplikowanych modeli oraz wbudowane mechanizmy kontrolujace poprawność modelowanych elementów.

Specyficzną klasą oprogramowania FBM są tzw. programy obiektowe, których podstawową funkcją jest zestawianie gotowych obiektów w cyfrowe złożenie. Programy obiektowe bazują na obszernych bibliotekach sparametryzowanych wyrobów gotowych; znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie, w aranżacji wnętrz, ogrodów itp. Tego typu oprogramowanie jest łatwe w obsłudze i umożliwia korzystanie z niego przez osoby niezajmujące się zawodowo CAD (sprzedawcy, użytkownicy prywatni). Niektóre z tego typu programów umożliwiają sporządzenie dokumentacji płaskiej oraz specyfikacji ilościowej i cenowej projektu.

Innowacją w dziedzinie profesjonalnych modelerów CAD opartych na technice FBM jest zmiana w koncepcji wprowadzania przekształceń w złożonym cyfrowym modelu części. W tradycyjnym podejściu modyfikacji wymiarów dokonuje się na drzewie konstrukcji, wybraną cechę konstrukcyjną (np. otwór) wskazuje się na drzewie konstrukcji, a następnie wprowadza nową wartość wybranego parametru (np. średnicy otworu). W kwietniu 2008 roku na targach w Hanowerze koncern Siemens PLM Software przedstawił najnowszą wersję modelera średniego poziomu (system Solid Edge) z tzw. Synchronous Technology – interfejsem, którego istotą jest możliwość modyfikowania geometrii bezpośrednio na ekranie. Nowe inteligentne narzędzia modelowania same próbują przewidzieć rodzaj zmiany konstrukcyjnej, jaką chce wykonać konstruktor, i wyświetlają menu podręczne, w którym można wpisać nową wartość parametru. W interfejsie Synchronous Technology zrezygnowano z przedstawiania dość skomplikowanych dla początkujących użytkowników relacji pomiędzy poszczególnymi cechami konstrukcyjnymi (relacji rodzic – potomek), program CAD automatycznie identyfikuje zależności geometryczne występujące w modelu. Udoskonalono znane od początku lat osiemdziesiątych XX wieku algorytmy rozpoznawania cech konstrukcyjnych (ang. *Automatic Feature Recognition* – AFR).

AFR znajduje zastosowanie przede wszystkim w modułach CAM, w których wykorzystuje się zaawansowane algorytmy automatycznie wyszukujące w modelu typowe cechy technologiczne (tj. kieszenie,

sloty, otwory itd.) i dzięki temu automatycznie generujące ścieżki narzędzi. W najnowszym oprogramowaniu technologia ta działa także na podstawie brył zaimportowanych z innych systemów CAD i pozbawionych drzewa historii.

3.6. Wykorzystanie technik KBE w modelowaniu cyfrowym

Szacuje się, że około 80% pracochłonnych zadań projektowo-konstrukcyjnych przeprowadzanych w zaawansowanych systemach CAD/CAM/CAE ma charakter rutynowy [Skarka 2007]. Tego typu zadania można wspomagać z zastosowaniem technik KBE (Knowledge Based Engineering). KBE jest najnowszym etapem rozwoju systemów CAx[42] i polega na zastosowaniu w modelowaniu geometrycznym wiedzy zapisanej w sposób formalny. Takie podejście umożliwia: (1) zapewnienie zgodności z zasadami projektowania, (2) automatyzację pracy przez stosowanie inteligentnych szablonów projektowanych produktów z elementami kontrolującymi ich poprawność, (3) wykonanie automatycznej optymalizacji projektu według określonych kryteriów.

Przykładem oprogramowania wykorzystującego KBE jest CATIA[43], która za pośrednictwem modułów o nazwie Knowledgeware umożliwia implementację w procesie modelowania cyfrowego zapisanej w bazie danych wiedzy. Podstawowym tego typu modułem w systemie CATIA jest Knowledge Advisor (KWA), który zawiera wiele narzędzi kontrolno-automatyzujących wykonywany cyfrowy prototyp podzielonych na trzy kategorie[44]. Przykładem takiego narzędzia jest Rule (reguła), która pozwala za pomocą podstawowych operatorów logicznych (if...else itp.) zarządzać szeroko rozumianymi parametrami modelu (parametry w systemie CATIA to nie tylko wymiary, ale również inne wartości liczbowe, tekstowe czy logiczne, np.: aktywność operacji, nazwa

materiału czy liczba powtórzeń we wzorze). Przykład procedury Rule napisanej dla otworu przelotowego pokazano na rysunku 42.

```
;RULE_26
(IF
 (AND
 (AND
 (= FEATURE_IS "THROUGH_HOLE")
 (= SURFACE_IS "LEFT_SURFACE"))
 (OR
 (> HOLE_UPPER_LIMIT_IS PART_UPPER_LIMIT)
 (< HOLE_BOTTOM_LIMIT_IS PART_BOTTOM_LIMIT)
 (> HOLE_RIGHT_LIMIT_IS PART_RIGHT_LIMIT)
 (< HOLE_LEFT_LIMIT_IS PART_LEFT_LIMIT)
 ))
;THEN
;FEATURE EXTENDS BEYOND LIMITS OF PART
 (jaklim))
```

Rysunek 42. Przykład reguły dla otworu

Reguły można tworzyć, modyfikować, aktywować/dezaktywować lub usuwać na dowolnym etapie procesu projektowego. Inne narzędzie Check (sprawdzenie) pomaga w śledzeniu stanu wybranej właściwości. Przykładem jego zastosowania jest np. nadzór nad masą projektowanej części – w razie przekroczenia zadanej wartości masy zdefiniowany wcześniej Check zgłasza konstruktorowi odpowiedni komunikat informacyjny lub ostrzegawczy. Zestaw instrukcji Check nie ma wpływu na wartość nadzorowanego parametru, ostateczna decyzja o podjętych działaniach należy do konstruktora. Bardziej zaawansowaną wersją opisywanego narzędzia jest Reaction (reakcja), która w razie wystąpienia określonej sytuacji wykonuje zadaną przez użytkownika czynność, np. w razie przekroczenia przyjętej wcześniej średnicy kołnierza projektowanego elementu program automatycznie może zwiększyć liczbę otworów dla śrub mocujących. Inną ciekawą funkcją narzędzia Reaction jest możliwość zarządzania kosztami wyprodukowania projektowanej części. Po utworzeniu parametru opisującego np. koszt wykonania otworu sterowanie jego wartością odbywa się za pomocą prostej funkcji logicznej z operatorami „if...else”: jeżeli

materiałem jest aluminium, koszt wywiercenia otworu wynosi X groszy/mm długości, jeśli stal – Y groszy/mm długości. Następnie można zdefiniować listę, która zawiera wszystkie operacje technologiczne niezbędne do fizycznego wykonania projektowanego obiektu i uzyskać sumę kosztów wszystkich operacji. Odpowiednio zdefiniowany Check, jeśli suma kosztów wykonania przekroczy założoną wcześniej graniczną wartość, wyświetla komunikat lub wykonuje inną czynność (np. automatycznie zmienia materiał ze stali na stop aluminium).

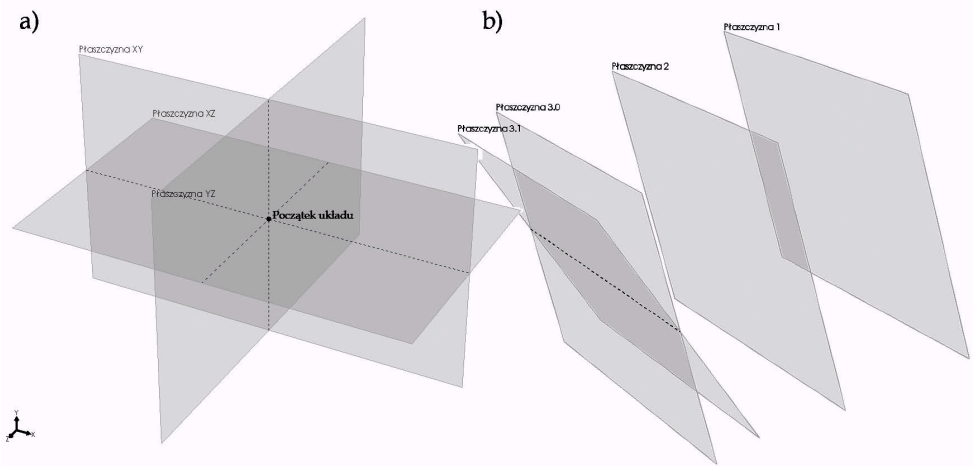
W wyniku zastosowania funkcji modułów KWA można opracować inteligentne modele geometryczne – szablony konstrukcyjne oferujące o wiele większe możliwości niż zwykła parametryzacja[45]. Takie systemowo opracowane inteligentne szablony konstrukcyjne nazywane są w literaturze modelami autogenerującymi[46].

KWA w modułach CAM polega na wykorzystaniu bazy danych zawierającej kompletne informacje o posiadanych maszynach, dostępnych narzędziach, możliwych prędkościach i posuwach. Baza jest na bieżąco uaktualniana i weryfikowana. Dzięki takiemu otwartemu rozwiązaniu program uczy się, w jaki sposób automatycznie generować strategię obróbczą dla konkretnego obrabianego już wcześniej detalu. Gromadzona wiedza może być wielokrotnie później wykorzystywana, co powoduje dużą oszczędność czasu w przygotowywaniu technologii, ponieważ zebranie wszystkich specyficznych dla danej firmy informacji technologicznych w jednym miejscu uwalnia od konieczności każdorazowego ich podawania. Raz nauczony system będzie prawidłowo proponował podczas programowania części nie tylko narzędzia, ale i zalecane parametry obróbki.

3.7. Wybrane techniki modelowania cyfrowego

Istnieje ogromna liczba technik modelowania cyfrowego. W tym podpunkcie przedstawiono kilka przykładów częściej stosowanych technik.

Podstawą modelowania we współczesnym oprogramowaniu CAD są płaszczyzny konstrukcyjne, na których tworzy się szkice 2D. W obszarze modelowania są zwykle predefiniowane trzy ortogonalne płaszczyzny główne (rys. 43a), dodatkowo istnieje możliwość utworzenia dowolnej liczby płaszczyzn zdefiniowanych przez użytkownika (rys. 43b).

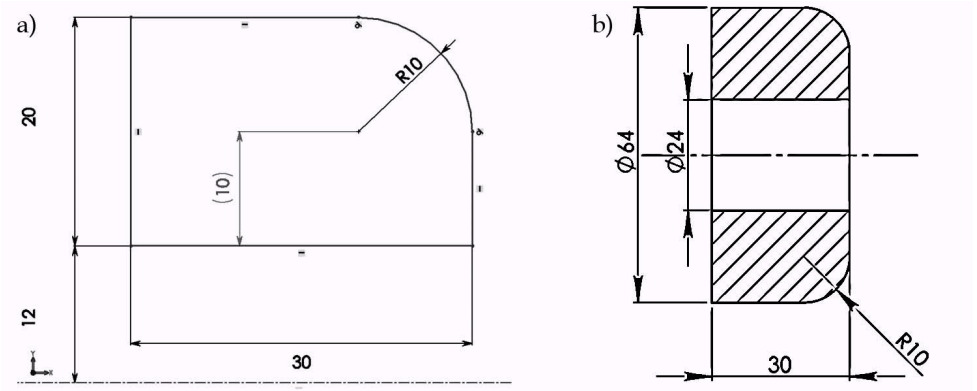


Rysunek 43. Płaszczyzny konstrukcyjne: a) główne, b) zdefiniowane przez użytkownika

Płaszczyzny zdefiniowane przez użytkownika mogą powstawać przez:

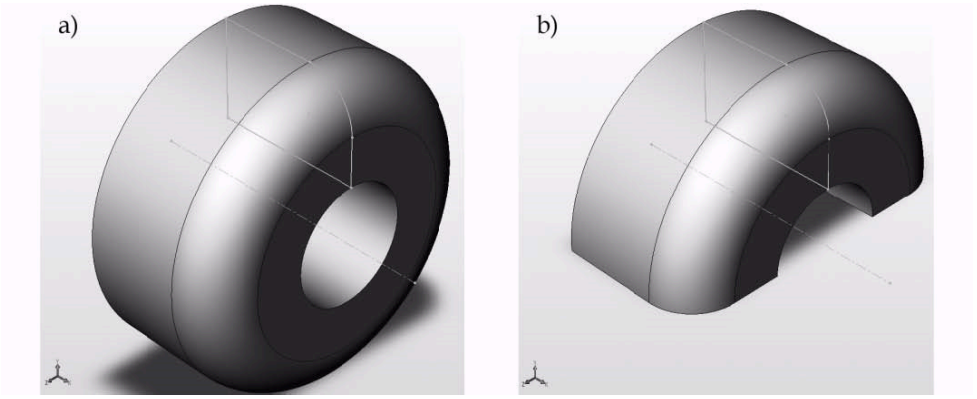
- określenie odległości nowej płaszczyzny od istniejącej (w wyniku czego nowa płaszczyzna będzie równoległa do płaszczyzny istniejącej),
- ustawienie płaszczyzny pod kątem do istniejącej (w tym wypadku dodatkowo należy zdefiniować miejsce przecięcia się płaszczyzn przez wskazanie np. krawędzi lub prostej konstrukcyjnej),
- zdefiniowanie płaszczyzny na obiektach (np. na trzech punktach, na krawędzi i punkcie itp.).

W trakcie modelowania można w razie potrzeby włączać i wyłączać widoczność wybranych płaszczyzn. Jak wspomniano, płaszczyzny konstrukcyjne służą do umieszczania na nich szkiców 2D będących podstawą do tworzenia obiektów trójwymiarowych. Przykład takiego szkicu przedstawia rysunek 44a, posłużył on do wykonania obiektu trójwymiarowego, którego rysunek techniczny prezentuje rysunek 44b.



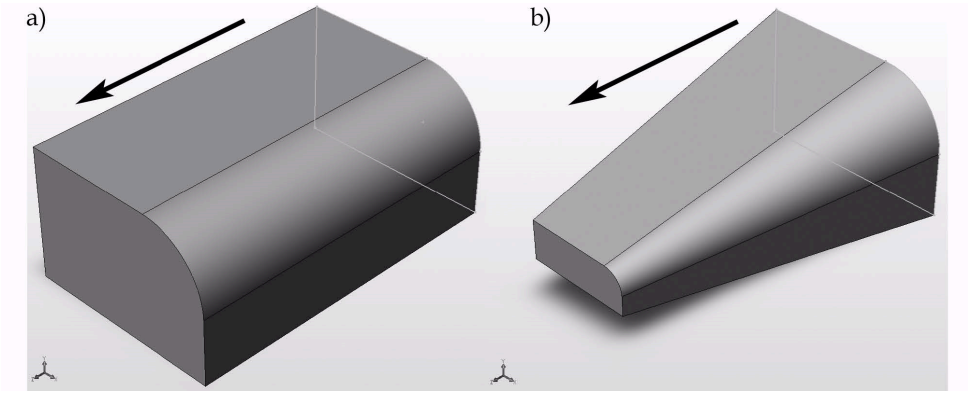
Rysunek 44. Szkic części obrotowej: a) szkic do wykonania modelu cyfrowego, b) rysunek wykonawczy wygenerowany z modelu cyfrowego

Istnieją dwie podstawowe techniki uzyskiwania obiektów 3D z płaskich szkiców: **obrót profilu** oraz **wyciągnięcie profilu**, w obu technikach można zdecydować o wielu opcjach dodatkowych. Model cyfrowy uzyskany ze szkicu przedstawionego na rysunku 44a pokazano na rysunku 45. Rysunek 45a przedstawia efekt obrotu profilu o 360 , natomiast rysunek 45b o 180 symetrycznie do płaszczyzny szkicu.



Rysunek 45. Model cyfrowy wykonany przez obrót profilu; a) o 360 , b) o 180 symetrycznie względem płaszczyzny szkicu

Efekt wyciągnięcia profilu został przedstawiony na rysunku 46, podstawowym parametrem podczas wyciągania jest długość wyciągnięcia. Na rysunku 46a przedstawiono wyciągnięcie proste, natomiast na rysunku 46b wyciągnięcie ze zwężeniem.

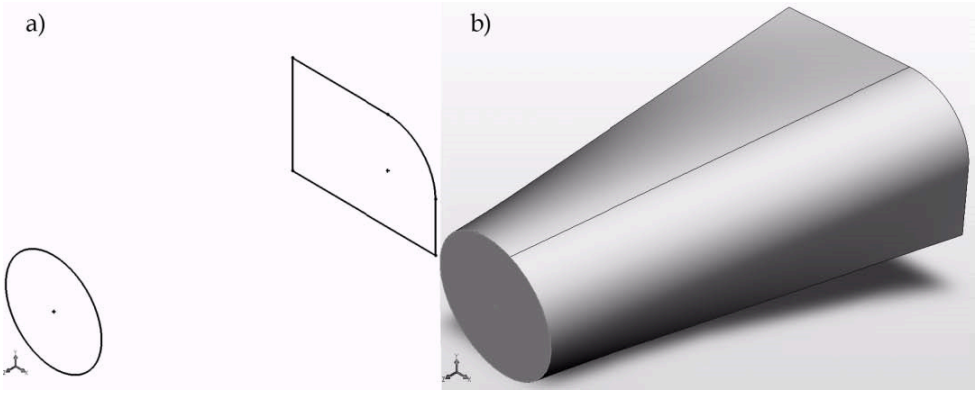


Rysunek 46. Wyciągnięcie profilu na długość 50: a) proste, b) ze zwężeniem 8

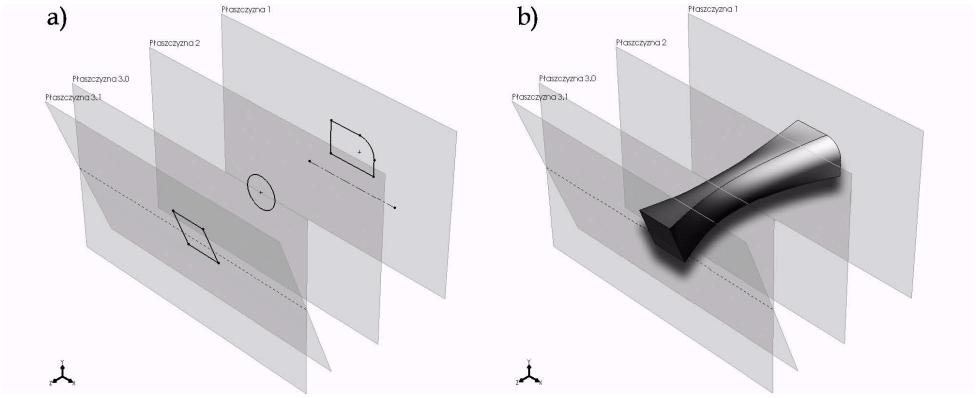
Wyciągnięcie można tworzyć pomiędzy zdefiniowanymi wcześniej szkicami. Efekt takiej operacji przedstawia rysunek 47. W tym wypadku długość uzyskanego obiektu 3D zależy od odległości płaszczyzn, na których znajdują się szkice, natomiast kształt wynika z kształtu naszkicowanych figur.

Wyciągać obiekty można przez dowolną liczbę szkiców, na rysunku 48 przedstawiono przykład wyciągnięcia przez trzy szkice leżące

na płaszczyznach konstrukcyjnych ustawionych pod kątem względem siebie.

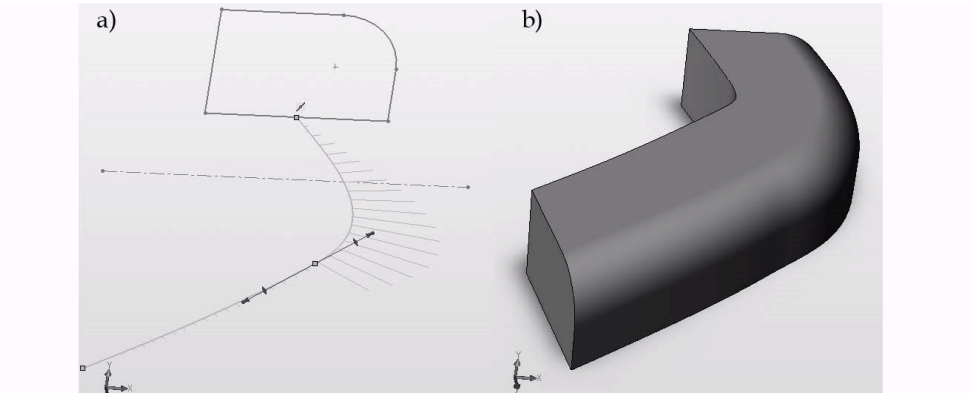


Rysunek 47. Wyciągnięcie przez dwa szkice: a) szkice, b) efekt wyciągnięcia



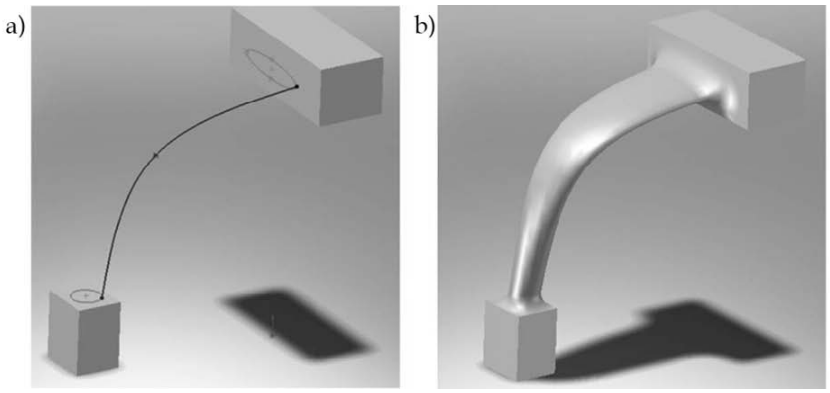
Rysunek 48. Wyciągnięcie przez trzy szkice leżące na płaszczyznach ustawionych pod kątem: a) szkice, b) efekt wyciągnięcia

Szkice można wyciągać po dowolnych zdefiniowanych wcześniej ścieżkach. Przykład wyciągnięcia po splajnie przedstawia rysunek 49.



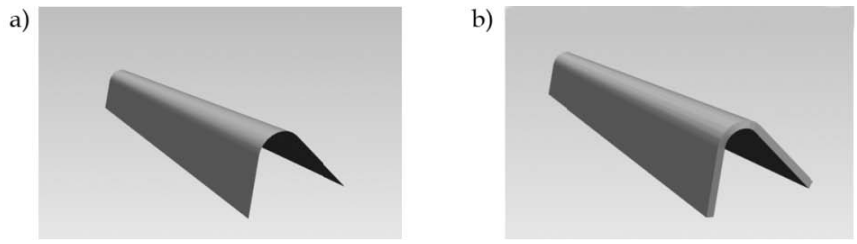
Rysunek 49. Wyciągnięcie po ścieżce: a) szkic i ścieżka, b) efekt wyciągnięcia

Wyciągnięcie po ścieżce może być zrealizowane pomiędzy dwoma szkicami. Przykład wspornika zamodelowanego tą metodą przedstawiono na rysunku 50.



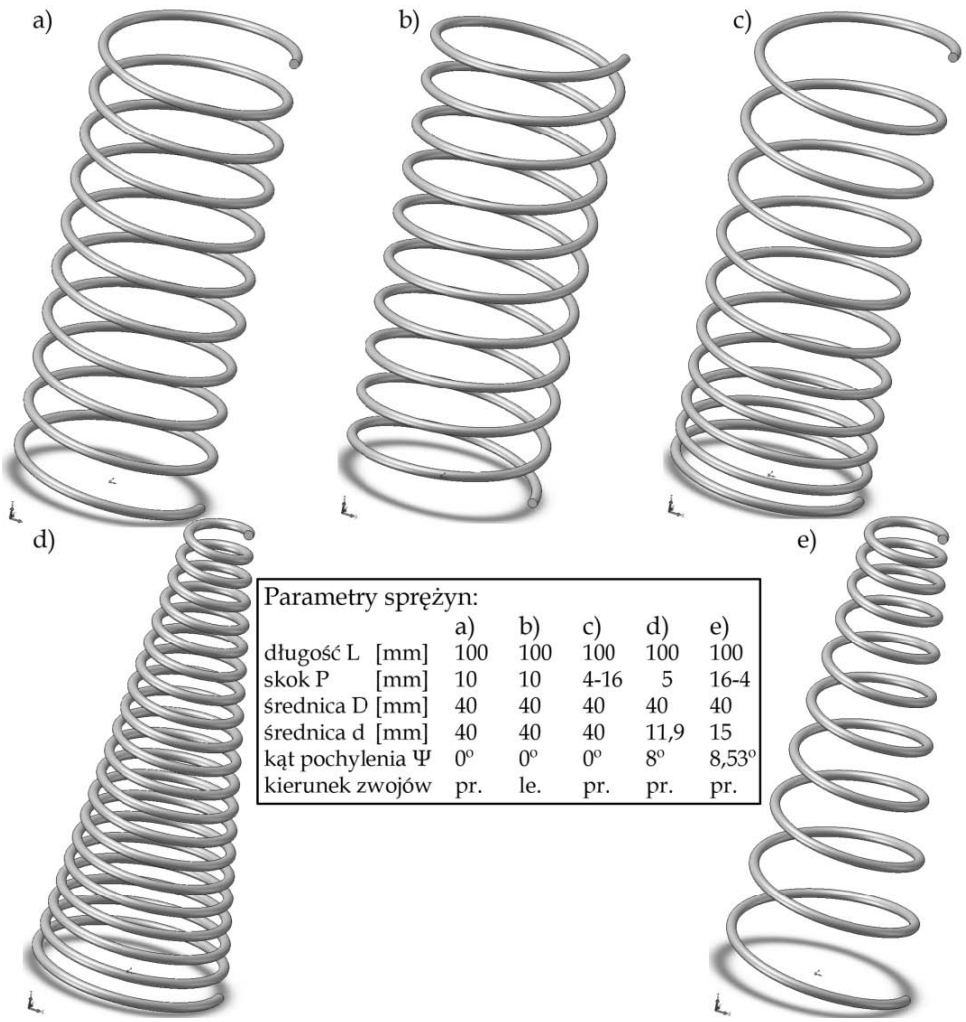
Rysunek 50. Wyciągnięcie po ścieżce pomiędzy dwoma przekrojami: a) przekroje i ścieżka, b) efekt wyciągnięcia

W modułach przeznaczonych do modelowania konstrukcji blaszanych można przypisywać grubość dowolnemu modelowi powierzchniowemu (rys. 51).



Rysunek 51. Przypisanie grubości modelowi powierzchniowemu: a) model powierzchniowy, b) model powierzchniowy z grubością

Na rysunku 52 zamieszczono przykłady modelowania sprężyn przez wyciąganie koła. Koło zostało naszkicowane na płaszczyźnie konstrukcyjnej, a następnie wykorzystano funkcję zautomatyzowanego wyciągnięcia po helisie. Istnieje wiele edytowalnych parametrów takiej helisy, zamieszczono je w tabeli na rysunku 52.

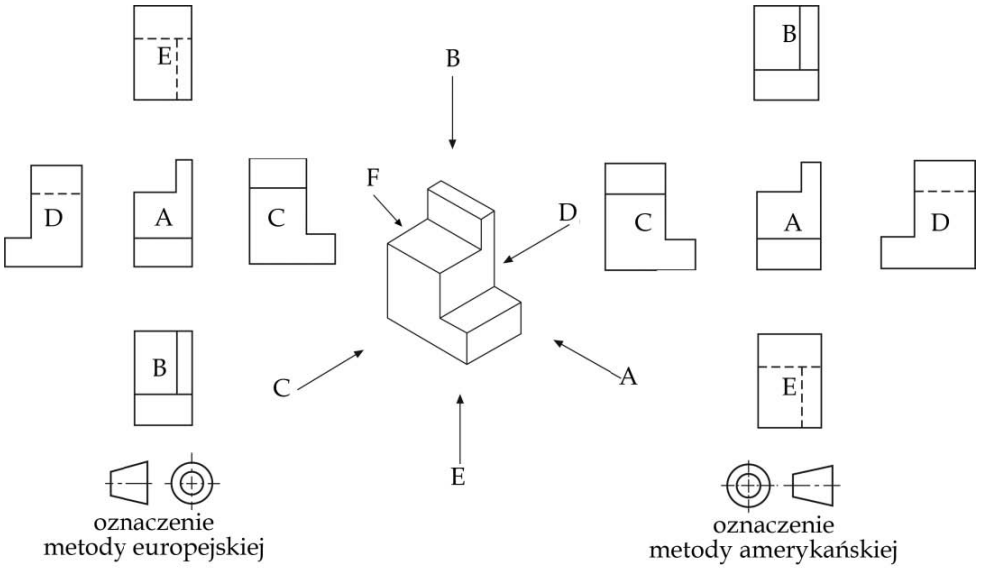

a)
b)
c)
d)
e)
Parametry sprężyn:
a) b) c) d) e)
długość L [mm] 100 100 100 100 100
skok P [mm] 10 10 4-16 5 16-4
średnica D [mm] 40 40 40 40 40
średnica d [mm] 40 40 40 11,9 15
kąt pochylenia Ψ 0° 0° 0° 8° 8,53°
kierunek zwojów pr. le. pr. pr. pr.

Rysunek 52. Modelowanie sprężyn przez wyciąganie przekroju po helisie: a) sprężyna walcowa prawa o stałym skoku, b) sprężyna walcowa lewa o stałym skoku, c) sprężyna walcowa prawa o zmiennym skoku, d) sprężyna stożkowa prawa o stałym skoku, e) sprężyna stożkowa prawa o zmiennym skoku

3.8. Przekształcanie rysunków 2D w modele 3D

Większość współczesnych programów CAD oferuje możliwość półautomatycznego przekształcenia wektorowych rysunków wykonanych na płaszczyźnie w cyfrowe modele trójwymiarowe. Problem konwersji z 2D na 3D dotyczy zazwyczaj starszej elektronicznej dokumentacji rysunkowej, która zwykle była wykonywana jedynie w formie płaskich rysunków.

Przykładami programów mających możliwość przekształcania dokumentacji 2D w 3D może być Pro/ENGINEER Wildfire 4 (2008), Autodesk Inventor 2009 oraz SolidWorks 2007. Idea konwersji we wszystkich wymienionych systemach jest identyczna, materiałem wejściowym jest rysunek 2D wykonany w rzutach prostokątnych jedną z dwóch stosowanych w technice metod rzutowania (rys. 53).



Rysunek 53. Składanie rzutów w obiekt 3D – porównanie metod rzutowania: europejskiej i amerykańskiej

W zależności od kierunku rzutowania poszczególne rzuty z rysunku 53 mają następujące znormalizowane nazwy[47]:

- w kierunku A – rzut z przodu (rzut główny),
- w kierunku B – rzut z góry,
- w kierunku C – rzut od lewej strony,
- w kierunku D – rzut od prawej strony,

- w kierunku E – rzut z dołu,
- w kierunku F – rzut z tyłu (zaznaczono, lecz nie zamieszczono na rysunku 53).

Konwersja układu rzutów na model 3D polega na rozmieszczeniu poszczególnych rzutów na odpowiednich płaszczyznach (służą do tego specjalne narzędzia przedstawione w tabeli 15), a następnie przekształceniu rozmieszczonych rzutów na model 3D przez ich wyciągnięcie.

Tabela 15. Narzędzia do konwersji rysunków 2D na modele 3D (opracowano na podstawie dokumentacji SolidWorks 2007)

Narzędzie	**Piktogram**	**Opis**
Przód		Wybrane elementy szkicu podczas przekształcania na część 3D staną się widokiem od przodu.
Góra		Wybrane elementy szkicu podczas przekształcania na część 3D staną się widokiem od góry.
Prawa strona		Wybrane elementy szkicu podczas przekształcania na część 3D staną się widokiem od prawej strony.
Lewa strona		Wybrane elementy szkicu podczas przekształcania na część 3D staną się widokiem od lewej strony
Dół		Wybrane elementy szkicu podczas przekształcania na część 3D staną się widokiem od dołu.
Wstecz		Wybrane elementy szkicu podczas przekształcania na część 3D staną się widokiem od tyłu.

Pomocniczy		Wybrane elementy szkicu podczas przekształcania na część 3D staną się widokiem pomocniczym (dodatkowo należy określić kąt widoku pomocniczego).
Utwórz szkic z wybranych elementów		Wybrane elementy szkicu staną się nowym szkicem.
Napraw szkic		Poprawienie błędów w szkicu, typowe błędy to: zachodzące na siebie geometrie, niewielkie przerwy lub wiele niewielkich segmentów tworzących pojedynczy element.
Wyrównaj szkic		Należy wybrać krawędź w jednym widoku, aby wyrównać z krawędzią wybraną w drugim widoku.
Wyciągnij		Konwersja na model 3D utworzony z wybranych elementów szkicu. Nie ma konieczności wybierania całego szkicu.
Wytnij		Wycięcie operacji z wybranych elementów szkicu. Nie ma konieczności wybierania całego szkicu.

3.9. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 3.

1. Wymień układy współrzędnych stosowane w CAD i krótko je scharakteryzuj.

2. Wymień rodzaje modeli CAD i krótko je scharakteryzuj.
3. Wymień podstawowe operacje algebry Boole'a na bryłach.
4. Podaj trzy podstawowe sposoby tworzenia brył.
5. Co oznacza termin „modelowanie bezpośrednie" (ang. *direct shape modeling*)?
6. Wymień ważniejsze prymitywy płaskie.
7. Wymień ważniejsze prymitywy przestrzenne.
8. Jaka jest różnica pomiędzy torusem a toroidem?
9. Omów operację wyciągania przekroju.

4. Więzy i parametryzacja

4.1. Więzy

Określenie „więzy” pochodzi z mechaniki klasycznej i oznacza ograniczenie możliwości przemieszczania się punktu. W CAD pojęcie to rozumiane jest nieco szerzej. Wyróżnia się dwa rodzaje więzów: **więzy geometryczne** (więzy postaciowe i wymiarowe) oraz **więzy kinematyczne**. Więzy geometryczne są stosowane głównie w trakcie sporządzania szkicu, który jest podstawą do wygenerowania trójwymiarowego modelu części. Więzy geometryczne i wymiarowe są odpowiedzią na potrzebę przyspieszenia procesu modelowania. We współczesnych parametrycznych[48] programach CAD (np. CATIA, Inventor, SolidWorks) pierwszym etapem jest sporządzenie szkicu na płaszczyźnie. Wynikiem szkicowania jest szkic zgrubny, wyobrażający ogólny zarys przedmiotu, w następnej kolejności nakłada się więzy postaciowe zapewniające odpowiednie relacje pomiędzy prymitywami (okręgami, odcinkami itp.) a elementami konstrukcyjnymi (linie i punkty konstrukcyjne). Ostatnim krokiem szkicowania jest nałożenie więzów wymiarowych (długości i kąta).

Więzy kinematyczne znajdują zastosowanie w trakcie przygotowywania animacji i symulacji (np. montażu).

Więzy geometryczne – postaciowe i wymiarowe

Więzy postaciowe to relacje między elementami modelu geometrycznego (odcinkami, łukami, okręgami itp.), np.:

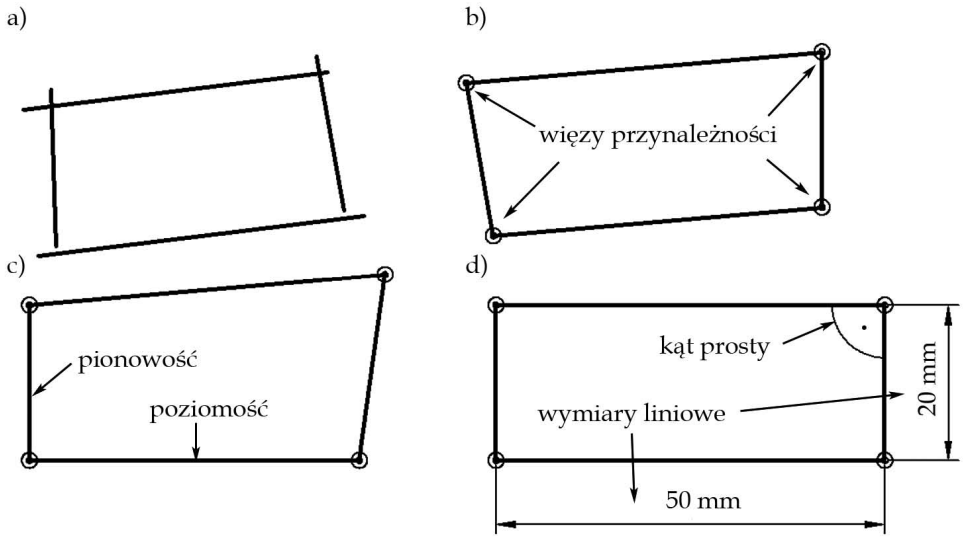
- połączenie końców (warunek przynależności punktów),
- prostopadłość obiektów względem siebie (np. odcinków, prostych konstrukcyjnych); specyficznym przypadkiem tego więzu jest

warunek równoległości względem osi (warunek pionowości lub poziomowości),
- równoległość obiektów względem siebie,
- styczność (okręgów, odcinka i okręgu, odcinka i elipsy itp.),
- współliniowość (odcinki znajdują się na tej samej prostej),
- współśrodkowość (np. okręgów lub ich wycinków),
- inna zależność określona równaniem lub nierównością, np. warunek symetrycznego położenia dwóch elementów względem wybranej prostej lub płaszczyzny (np. osi, prostej konstrukcyjnej, płaszczyzny konstrukcyjnej).

Niektóre rodzaje więzów geometrycznych funkcjonują wyłącznie z odcinkami, natomiast inne wyłącznie z łukami lub okręgami.

W programach CAD rozróżnia się następujące więzy wymiarowe:

- odległości obiektów do siebie,
- długości obiektów,
- kąta.



Rysunek 54. Więzy postaciowe i wymiarowe w szkicu: a) cztery odcinki bez więzów, b) odcinki po przypisaniu geometrycznych więzów przynależności, c) odcinki po przypisaniu geometrycznych więzów równoległości względem osi pionowej i poziomej, d) sytuacja po przypisaniu więzów wymiarowych kąta i długości

Przykład zastosowania więzów do szkicu przedstawia rysunek 54. Dokładanie kolejnych więzów geometrycznych oraz wymiarowych wiąże szkic, definiując jego kształt i wymiary. Obydwa rodzaje więzów uzupełniają się wzajemnie. Bardzo często wiązania szkicu są nadawane automatycznie przez program w trakcie rysowania. Wiązania mogą być pokazywane, ukrywane, dodawane i usuwane podczas szkicowania. We współczesnych programach CAD więzy wymiarowe są parametryczne, co oznacza, że można zmieniać ich wartość na każdym etapie szkicowania. Oprócz funkcjonalnych i uzupełniających wymiarów parametrycznych można umieszczać wymiary informacyjne, które podają wartość, ale nie umożliwiają jej edytowania, są to tzw. wymiary zależne[49].

Przykład więzów postaciowych w wybranych programach CAD zawiera tabela 16.

Przykłady więzów wymiarowych zawiera tabela 17.

Tabela 16. Więzy postaciowe w wybranych programach CAD

Program **Opis**	**CATIA V5R18**	**SolidWorks 2007**	**Autodesk Inventor 2009**
Symetria elementów względem wybranej osi	Symmetry	Symetryczny	Symetria
Utwierdzenie elementu	Fix	Nieruchoma	Unieruchomienie
Współliniowość	Coincidence	Wspólne	Przynależność
Łuki i okręgi mają ten sam punkt środka	Concentricity	Koncentrycznie	Współśrodkowość
Dwa elementy pozostają styczne	Tangency	Styczne	Styczność

Elementy są równolegle do siebie	Parallelism	Równoległe	Równoległość
Dwa elementy są prostopadłe do siebie	Perpendicular	Prostopadłe	Prostopadłość
Linie są poziome lub pionowe (zgodnie z definicją przestrzeni bieżącego szkicu). Punkty zostaną wyrównane poziomo lub pionowo	Horizontal	Pozioma	Poziomowość
	Vertical	Pionowa	Pionowość
Środek odcinka prostej wyznaczany przez dowolny punkt	Midpoint	Punkt środkowy	-
Równa wzajemna odległość pomiędzy trzema punktami	Equidistant point	-	-
Elementy leżą na tej samej nieskończonej linii	-	Współliniowa	Współliniowość

Długości linii lub promieni są równe	-	Równa	Równej długości
Dwa punkty są łączone w jeden punkt	-	Scalaj punkty	-
Punkt pozostaje w miejscu przecięcia linii	-	Przecięcie	-
Elementy mają ten sam punkt środka oraz promień	-	Współpromieniowa	-

Tabela 17. Więzy wymiarowe w wybranych programach CAD

	Autodesk Inventor 2009	**CATIA V5 R18**	**SolidWorks 2007**
Odległość pomiędzy dwoma elementami	Odległość	Dis tance	Odległość
Długość elementu	Długość	Length	Długość
Kat pomiędzy odcinkami	Kąt	Angle	Kąt
Długość promienia lub średnicy okręgu lub luku	Promień/ średnica	Radius/diameter	Promień/ średnica
Długość dłuższej osi elipsy	-	Semimajor axis	-
Długość krótszej osi elipsy	-	Semiminor axis	-

Długość luku	-	-	Długość luku

Podczas wiązania szkicu obowiązują ogólne zasady:

- jeżeli to możliwe, należy używać wiązań geometrycznych przed wymiarowymi,
- nie należy umieszczać więcej wiązań, niż jest to konieczne,
- w pierwszej kolejności należy umieszczać wymiary najistotniejsze,
- wymiary większe umieszcza się przed mniejszymi.

Modelowanie zespołów – więzy kinematyczne

Zespół składa się z dwóch lub większej liczby części połączonych w określony sposób. Wzajemny ruch poszczególnych części jest ograniczony przez więzy (całkowicie – połączenia spoczynkowe, lub częściowo – połączenia ruchowe, mechanizmy).

W konstruowaniu tradycyjnym projektant tworzy dokumentację konstrukcyjną od góry do dołu, czyli najpierw sporządza rysunek złożeniowy, następnie rysunki wykonawcze poszczególnych części składowych. Szkicowanie rozpoczyna od najważniejszych części zespołu i sukcesywnie dodaje pozostałe elementy. W modelowaniu cyfrowym można się poruszać bez ograniczeń po całym drzewie konstrukcji, wykorzystując naprzemiennie strategię tworzenia dokumentacji od góry do dołu i z dołu do góry.

Zastosowania modelowania zespołów:

- sprawdzenie dopasowania i konfliktów położenia,
- analiza łańcuchów tolerancji,
- wizualizacja (fotorealistyczna),
- animacja ruchu,
- analiza kinematyki mechanizmów (wzajemny ruch),
- analiza dynamiki mechanizmów (siły w elementach),
- automatyczne tworzenie dokumentacji (rysunków złożeniowych i listy części).

Kluczowe w modelowaniu zespołów są więzy kinematyczne. Istnieją dwa rodzaje więzów kinematycznych – więzy holonomicznie

(zmniejszają liczbę zmiennych konfiguracyjnych – liczbę stopni swobody) oraz więzy nieholonomiczne (ograniczenia na dopuszczalne prędkości w ruchu liniowym i obrotowym – w sensie kierunków, zwrotów i wartości wektorów prędkości). Więzy kinematyczne znajdują zastosowanie w syntezie i analizie wirtualnej makiety wytworu, m.in. do:

- analizy przestrzennej,
- analizy strukturalnej,
- analizy kinematycznej układów.

Podstawowe więzy kinematyczne holonomiczne to więzy zestawiające (np. typu płaszczyzna – płaszczyzna, linia – linia, punkt – punkt), więzy kątowe i wstawiające (jeden obiekt w drugi, np. nit w otwór). Podczas definiowania więzów ustala się parametry geometryczne, np. odległość dwóch płaszczyzn równoległych, kąt pomiędzy obiektami itp.

Więzy nieholonomiczne wykorzystuje się do analizy strukturalnej i kinematycznej układów mechanicznych powiązanych wcześniej więzami holonomicznymi. Analizę tego typu można wykonać na trzy sposoby: po pierwsze, zastosować „ręczne" sterowanie sposobem realizacji ruchu – czyli za pomocą suwaków przesuwać poszczególne elementy mechanizmu, uzyskując wiele istotnych informacji na temat sposobu jego działania, np. o możliwych zakresach przesuwu czy obrotu członów tworzących dany łańcuch kinematyczny. W tej metodzie nie można sterować prędkością ruchu. Po drugie, założyć całkowity czas realizacji wybranej operacji – system ustala domyślną prędkość ruchu. Pewną odmianą tej metody jest podzielenie operacji na sekwencje i ścisłe zaplanowanie czasu trwania danego fragmentu ruchu. Wymaga to jednak wygenerowania odpowiednio dużej liczby symulacji dla każdej analizowanej operacji. Trzeci sposób polega na zastosowaniu dokładnego sterowania parametrami ruchu, a w szczególności jego prędkością, przez stosowanie formuł matematycznych i reguł logicznych. Bardziej zaawansowaną odmianą tej metody jest stosowanie tzw. wykresów prędkości, gdy za pomocą elementów graficznych (np. proste, łuki, splajny) można planować sposób poruszania się mechanizmu, a następnie za pomocą

stosownych funkcji korelacyjnych dokonać zamiany postaci graficznej na matematyczną.

4.2. Parametryzacja

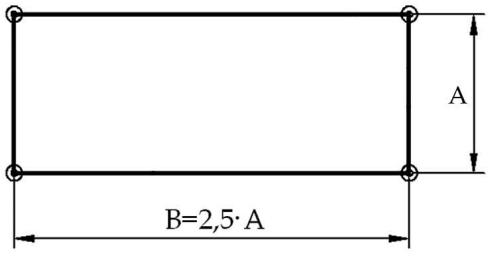
Parametryzacja to zastąpienie liczbowych wymiarów nazwami zmiennych (parametrami) i związana z tym możliwość stosowania równań i nierówności określających zależności między tymi zmiennymi i automatycznie modyfikujących model geometryczny. Parametryzacja stanowi pewnego rodzaju pomost między modelem geometrycznym a modelem matematycznym i zapewnia wzajemną zgodność tych modeli. Postać konstrukcyjna oraz układ wymiarów projektowanego obiektu technicznego są zapisane w programie CAD w formie modelu cyfrowego, natomiast zmienne wartości wymiarów czytane są ze zbiorów zewnętrznych (z zewnętrznego pliku sporządzonego np. w arkuszu kalkulacyjnym). W ten sposób ma miejsce połączenie zapisu jakościowych cech konstrukcyjnych (geometrycznej postaci konstrukcyjnej) z ilościowymi cechami konstrukcji (wartościami wymiarów). Zmiana wartości jednego wymiaru w zapisie parametrycznym konstrukcji powoduje zmianę innych wymiarów wynikowych modelu. Stosując parametryzację, bardzo łatwo jest uzyskać rodzinę konstrukcji (w tym zwłaszcza typoszereg wyrobów znormalizowanych).

Parametry geometryczne modelu można edytować przez edycję szkicu, z którego go utworzono, lub przez zmianę wartości parametrów cechy konstrukcyjnej użytej do jego tworzenia. Na przykład można zmienić długość wyciągnięcia dla elementu wyciągniętego, wprowadzając nową wartość w pozycji „wyciągnięcie” w drzewie strukturalnym modelu. W praktyce w programach CAD można korzystać z dwóch technik wprowadzania parametrów, i tak na przykład w szkicowniku programu CATIA V5 można stosować parametryzację dynamiczną oraz relacyjną [Skarka i Mazurek 2005]. Parametryzacja dynamiczna polega na manualnej zmianie wartości liczbowych wybranych wymiarów, w wyniku czego zapis konstrukcji

w sposób dynamiczny modyfikuje w układzie wymiarów ich wartości oraz geometryczną postać konstrukcyjną modelu. Uzmiennienie wartości wymiarów ma duże znaczenie w procesie projektowania elementów, natomiast mniejsze w procesie generowania dokumentacji technicznej o znanej postaci konstrukcyjnej i zweryfikowanych wartościach wymiarów.

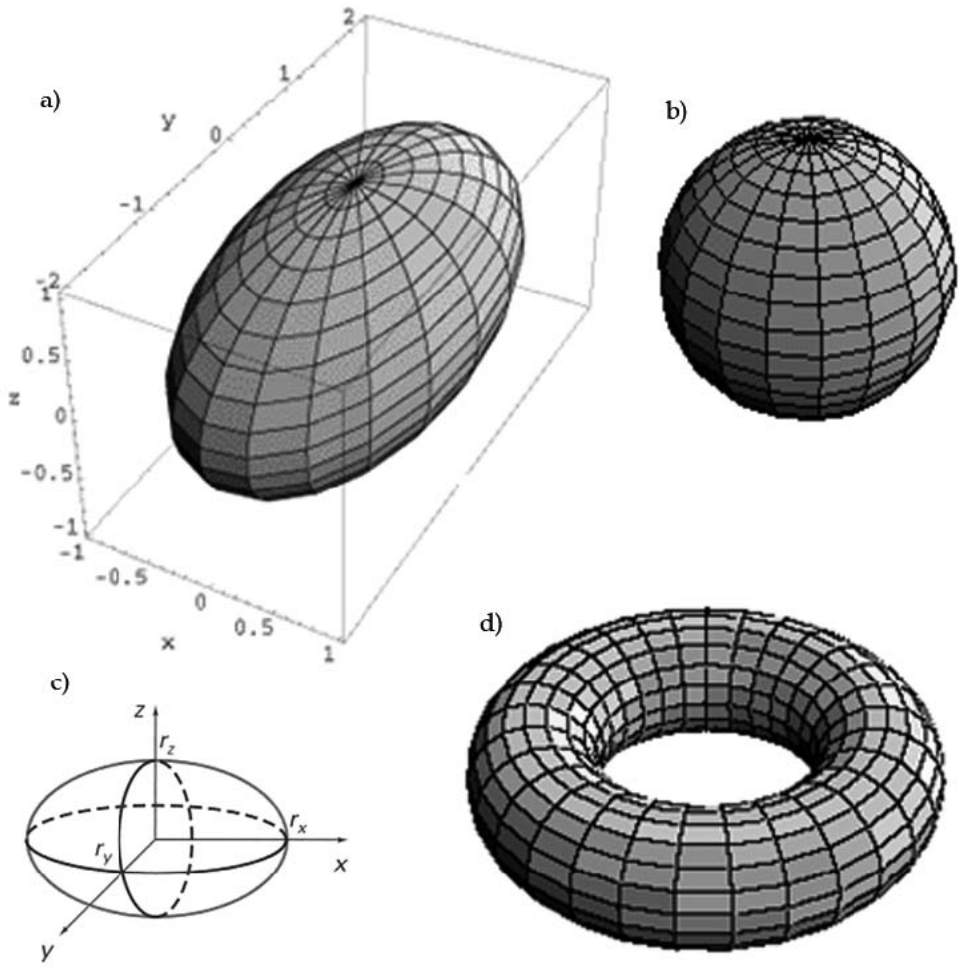
Parametryzacja relacyjna pozwala na zmianę zapisu konstrukcji przez zmianę wartości wymiarów wyznaczonych w sposób relacyjny do określonej zmiennej niezależnej, np. wartości cech charakterystycznych, istotnego wymiaru. Relacje między zmienną niezależną a wartościami wymiarów zapisane są w odpowiednim edytorze[50]. Po wprowadzeniu określonej wartości zmiennej niezależnej obliczane są wartości wymiarów, po czym następuje aktualizacja istniejącego zapisu konstrukcji.

Na rysunku 55 przedstawiono sparametryzowany szkic, w którym wymiar B jest wymiarem zależnym od wymiaru A. Po wygenerowaniu ciągu wartości wymiaru A można w bardzo łatwy sposób uzyskać typoszereg rysowanych obiektów.



Rysunek 55. Parametryzacja szkicu

Nie tylko obiekty liniowe, ale także powierzchnie mogą być w pełni parametryczne. Przykładem może być rodzina elipsoidów przedstawiona na rysunku 56a.



Rysunek 56. Powierzchnie drugiego stopnia: a) elipsoid, b) sfera, c) wymiary elipsoidu, d) torus

Równania wybranych powierzchni drugiego stopnia zawiera tabela 18.

Tabela 18. Wybrane powierzchnie drugiego stopnia

Powierzchnia	**Równanie**	**Rysunek**
Elipsoida	$\left(\frac{x}{r_x}\right)^2+\left(\frac{y}{r_y}\right)^2+\left(\frac{z}{r_z}\right)^2=1$	rys. 56a

Sfera	$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$	rys. 56b
Torus	$\left[r - \sqrt{\left(\frac{x}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{r_y}\right)^2} \right]^2 + \left(\frac{z}{r_z}\right)^2 = 1$	rys. 56d

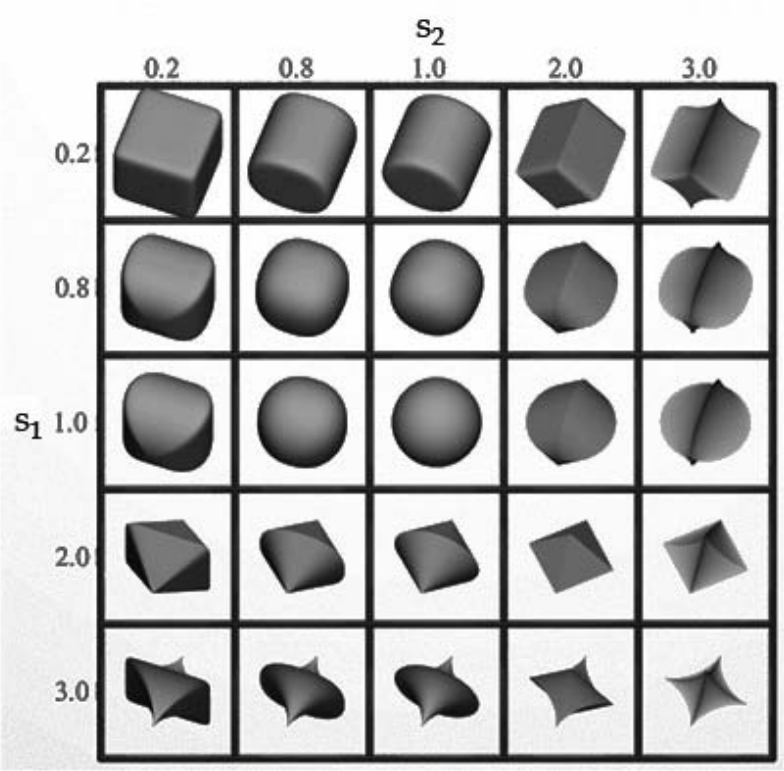
Równanie powierzchni drugiego stopnia w formie ogólnej przyjmuje postać:

$$a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot z^2 + 2f \cdot yz + 2g \cdot xz + 2h \cdot xy + 2p \cdot x + 2q \cdot y + 2r \cdot z + d = 0$$

Sparametryzowane równanie elipsoidy przedstawionej na rysunku 56b uzyskuje postać:

$$\left[\left(\frac{x}{r_x}\right)^{2/s_2} + \left(\frac{y}{r_y}\right)^{2/s_2} \right]^{s_2/s_1} + \left(\frac{z}{r_z}\right)^{2/s_1} = 1$$

W wyniku parametryzacji równania elipsoidy można otrzymać rodzinę elipsoid przedstawioną na rysunku 57. Parametrami sterującymi są $s_1 s_1$ i $s_2 s_2$; w przypadku gdy $s_1 = s_2 = 1$ $s_1 = s_2 = 1$, elipsoida uzyskuje postać regularną.



Rysunek 57. Rodzina elipsoid

Specyficznym przypadkiem elipsoidy jest sfera, dla której zachodzą zależności:

$$s_1 = s_2 = 1$$

oraz

$$r_x = r_y = r_z = r$$

Nie wszystkie programy CAD umożliwiają stosowanie parametryzacji modeli geometrycznych oraz więzów, jednak niewątpliwie jest to kierunek, w którym wszystkie programy tego rodzaju zmierzają.

4.3. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 4.

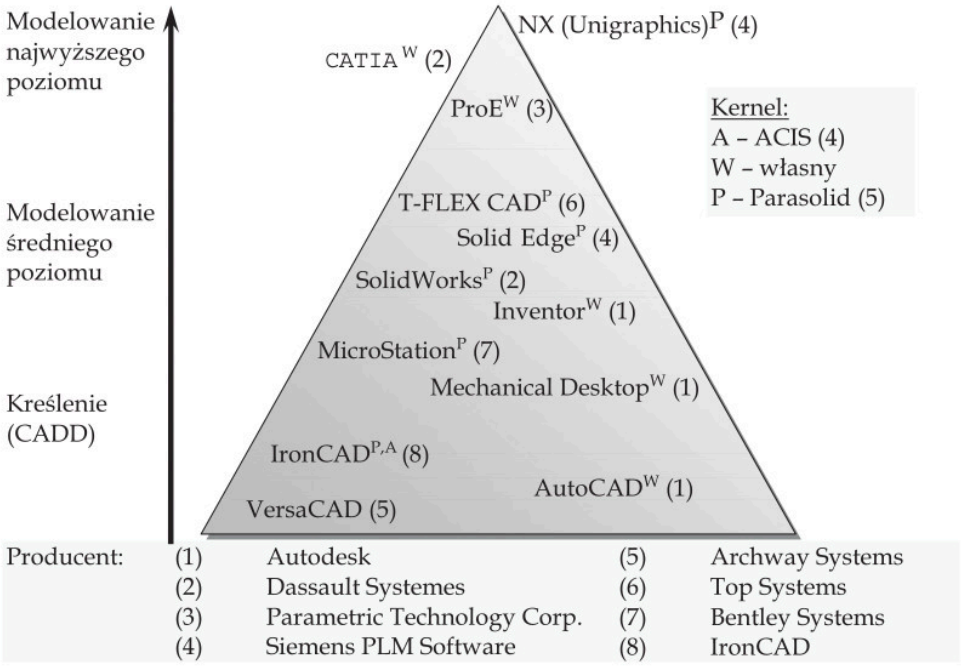
1. Wymień rodzaje więzów stosowanych w modelowaniu cyfrowym.

2. Wymień przykłady i scharakteryzuj więzy geometryczne (postaciowe i wymiarowe).
3. Co oznaczają pojęcia „wymiar sterujący” i „wymiar zależny”?
4. Wymień przykłady i scharakteryzuj więzy kinematyczne.
5. Na czym polega parametryzacja?
6. Wymień główne zastosowania modelowania zespołów.

5. Ważniejsze systemy CAD

5.1. Charakterystyka wybranych systemów CAD

Programy CAD różnią się miedzy sobą zakresem wspomagania prac inżynierskich oraz stopniem uniwersalności. Oprogramowanie wspomagające prace inżynierskie można podzielić na trzy grupy: (1) służące do kreślenia, (2) modelery średniego poziomu oraz (3) modelery najwyższego poziomu. Taką klasyfikację przedstawiono na rysunku 58, na którym umieszczono ważniejsze programy CAD stosowane w branży mechanicznej.



Rysunek 58. Klasyfikacja oprogramowania CAx stosowanego w branży mechanicznej

Najprostsze oprogramowanie, typu CADD, jest rodzajem elektronicznej deski kreślarskiej i służy do wydajnego wykonywania dokumentacji rysunkowej. Na drugim końcu skali znajdują się programy zawierające wiele specjalizowanych modułów umożliwiających cyfrowe modelowanie, w tym przeprowadzanie różnego rodzaju analiz i obliczeń (wytrzymałościowych, ergonomicznych symulacji montażu, symulacji procesów obróbki itp.) oraz zarządzanie cyklem życia produktu (PLM).

Rynek oprogramowania służącego do zarządzania cyklem życia produktu (PLM) oraz oprogramowania CAx[51] w chwili pisania podręcznika (sierpień 2008) jest podzielony między trzy firmy: Siemens PLM Solutions z oprogramowaniem Teamcenter

(PLM) oraz NX (CAx), Dassault SystÞmes z oprogramowaniem ENOVIA (PLM) oraz CATIA (CAx), Parametric Technology Corporation z oprogramowaniem WindChill (PLM) oraz Pro/Engineer (CAx). Rynek oprogramowania CAD średniego poziomu to przede wszystkim firmy Autodesk z oprogramowaniem Autodesk Inventor, Dassault SystÞmes z programem SolidWorks oraz Siemens PLM Solutions z Solid Edge. Oprogramowanie najniższego poziomu (przeznaczone do wykonywania płaskiej rysunkowej dokumentacji technicznej) to przede wszystkim AutoCAD i jego specjalizowane odmiany firmy Autodesk oraz wiele produktów mniejszych firm[52].

Z punktu widzenia uniwersalności zastosowań oprogramowanie CAx można podzielić nieco odmiennie na:

1) oprogramowanie specjalizowane CAD,
2) uniwersalne systemy CAD/CAM/CAE.

Programy specjalizowane przeznaczone są do zastosowania w ściśle określonej branży. Tego typu oprogramowanie dedykowane jest konkretnym wąskim grupom odbiorców (inżynierów), np. projektantom form wtryskowych, konstruktorom mebli itp. (np. Imos 8.0 – system NET/CAD/CAM dla meblarstwa). Zalety takiego oprogramowania to bardzo dobre dopasowanie do specyfiki potrzeb danego przedsiębiorstwa oraz niska cena. Wady to ograniczone możliwości zastosowań (brak uniwersalności i możliwości rozbudowy) oraz utrudniona współpraca z innymi programami CAD/CAM.

Rozbudowane systemy CAD/CAM/CAE stanowią pakiety (kompatybilnych ze sobą) programów wspomagających cały proces powstawania wyrobu. Zalety: duża uniwersalność zastosowań, dostęp do baz danych elementów znormalizowanych, duża liczba pozycji dostępnej literatury, rozbudowane systemy pomocy (help, tutoriale), dwukierunkowa asocjatywność z innymi systemami CAD. Do wad można zaliczyć wysoką cenę oraz konieczność dodatkowej kastomizacji oprogramowania wykonywanej przez specjalistyczne firmy.

Niemal wszystkie programy CAx mają budowę modułową, można wyróżnić dwa typy architektury modułowej: (1) system CAD/CAM ma kilka odmian dedykowanych dla różnych grup odbiorców, np. dla mechaników, architektów, elektryków itp. (np. ProEngineer, który ma dziewięć pakietów adresowanych do konkretnych grup odbiorców); (2) system składa się z modułu podstawowego (basic) oraz opcjonalnie dobieranych nakładek specjalistycznych (np. ASi-Profile, moduł do projektowania gięcia rur przeznaczony do Autodesk Inventora, BeCeZet – biblioteka części znormalizowanych dedykowana dla Solid Edge czy biblioteka GeniusMechanicCS LT dla AutoCAD).

Ważniejsze systemy CAD i CAM dystrybuowane w Polsce zestawiono w tabeli 19. Rodzaj programu oznaczono następującymi skrótami: CAD – oprogramowanie wspomagające projektowanie, CAM – oprogramowanie wspomagające wytwarzanie, CAD/CAM[53] – oprogramowanie integrujące wspomaganie projektowania i wytwarzania, CAx – oprogramowanie integrujące wspomaganie konstruowania i wytwarzania i zawierające dodatkowo moduły umożliwiające wykonywanie obliczeń wytrzymałościowych. Warunkiem umieszczenia w tabeli była lokalizacja dystrybutora

w Polsce. Dane zaczerpnięto ze stron WWW dystrybutorów (adresy internetowe zamieszczono na końcu tabeli).

Tabela 19. Ważniejsze systemy CAD oraz CAM popularne w Polsce

Nazwa programu	**Rodzaj**	**Producent**	**Dystrybutor**	**Uwagi**
Act/Cut	CAD/CAM	Alma	GM System Sp. z o.o.	Program specjalizowany. Cięcie i wykrawanie 2D (wycinarki, wykrawarki)
Alibre Design 10.0	CAD	Alibre Inc.	Datacomp Sp. z o.o.	Modeler średniego poziomu do parametrycznego modelowania bryłowego (wersja Alibre Design Xpress jest bezpłatna)
AlphaCAM V7	CAM	Licom System Ltd./ Planit	CNS Solutions Sp. z o.o.	Obróbka CNC drewna i metalu
ArtCAM	CAD/CAM	DELCAM pic	TORUS Sp. z o.o.	Obsługa ploterów 3D oraz frezarek NC w zakresie wykonywania reliefów, zwłaszcza artystycznych
AutoCAD 2009	CAD	Autodesk	Autodesk SA	Modeler niskiego poziomu, zwłaszcza do wykonywania dokumentacji 2D
AutoCAD Mechanical 2009	CAD	Autodesk	Autodesk SA	Modeler niskiego poziomu, zawiera biblioteki rysunków i części oraz generatory typowych części i kalkulatory podstawowych własności fizykomechanicznych
Autodesk Inventor Professional/Series	CAD	Autodesk	Autodesk SA	Modeler 3D średniego poziomu,

2009				umożliwia cyfrowe prototypowanie (tworzenie dokumentacji, dokonanie wizualizacji, symulacji oraz analizę działania)
AutoNEST	CAD	Radan System Pte Ltd	APLIKOM Sp. z o.o.	Do projektowania optymalnego rozkroju płaskich elementów na zadanym arkuszu materiału
Autopol	CAD	FCC Software AB	Evatronix SA	Do projektowania i tworzenia rozwinięć różnych komponentów z blachy
BricsCad V8	CAD	Bricsys NV. Belgia	Bricsys Polska	Modeler niskiego poziomu (CADD)
CAMWorks	CAM	Geometrie Software Solutions	SolidExpert	Program CAM dla SolidWorks oparty na bazie wiedzy (Knowledge Based Engineering)
CATIA V4/V5	CAx	Dassault Systemes	P.P.W. KOLTECH Sp. z o.o. KS Automotive Sp.z o.o.	System CAD/CAM/CAE wspomagający zarządzanie cyklem życia produktu (PLM)
CopyCAD	CAD	DELCAM pic	TORUS Sp. z o.o.	System reverse engineering do generowania powierzchni z zeskanowanych modeli 3D
DesignCAD 3D Max/Express 18.2 PL	CAD	IMSI	CAD-Projekt Wiktor Mielczarek	Do modelowania przestrzennego, tworzenia dokumentacji technicznej

				i animacji w branżach budowlanej (w tym konstrukcji drewnianych więźb dachowych), mechanicznej; do projektowania biżuterii, wzorów tkanin i innych
EdgeCAM 12.5 PL	CAM	Pathtrace	Nicom	Moduł CAM w pełni asocjatywnie integrujący się z oprogramowaniem CAD
FeatureCAM	CAD/CAM	DELCAM pic	TORUS Sp. z o.o., GM System Sp. z o.o., UGS Sp. z o.o.	Modułowy system CAM z możliwością modelowania cyfrowego
HiCAD neXt	CAD	IDS Software und Systeme GmbH	PROFPROJEKT	Projektowanie parametryczne 2 i 3D
HyperMill	CAM	OPEN MIND Technologies AG	EVATRONIX SA	System sterujący obrabiarkami numerycznymi dedykowany do produkcji wyspecjalizowanych form
IGEMS R7	CAD/CAM	Cadcraft AB	EVATRONIX SA	Wspomaga wycinanie elementów z arkusza blachy z jednoczesnym generowaniem kodu NC do maszyn wycinających
IMSpost	CAM	IMS Software	P.P.W. KOLTECH Sp. z o.o.	Zaawansowany generator postprocesorów
Lantek Expert	CAM	Lantek	Des Art Sp. z o.o.	Programowanie maszyn do cięcia

				blachy i wykrawania
MASTERCAM X2 PL	CAD/CAM	CNC Software	SolidExpert	Jeden z najpopularniejszych tego typu programów na świecie; umożliwia modelowanie, przygotowywanie rysunków, symulację graficzną drogi narzędzia i wygenerowanie programu NC
NC Polaris	CAM	CASO GmbH	APLIKOM Sp. z o.o.	Pakiet modułów do generowania programów CNC dla różnych maszyn sterowanych numerycznie. Współpracuje z programami AutoCAD i AutoCAD Mechanical
NC SIMUL	CAM	SPRING Technologies	P.P.W. KOLTECH Sp. z o.o.	Umożliwia symulację obróbki skrawaniem na ekranie monitora (wirtualna maszyna CNC), jak również programowanie maszyn NC i optymalizację programów obróbki skrawaniem
NX	CAx	UGS Corp.	Des Art Sp. z o.o., KOM-ODLEW Sp. z o.o., UGS Sp. z o.o., Nicom Computers	Modeler najwyższego poziomu stosowany w przemyśle motoryzacyjnym, narzędziowym i lotniczym. Ma wiele specjalizowanych modułów

NXCAM	CAM	UGS Corp.	Des Art Sp. z o.o., GM System Sp. z o.o.	System przeznaczony dla średnich i małych firm branż narzędziowej, samochodowej i lotniczej
PowerMILL	CAM	DELCAM pic	TORUS Sp. z o.o.	Oprogramowanie do generowania kodów NC i symulacji obróbki
PowerSHAPE	CAD	DELCAM pic	TORUS Sp. z o.o.	Pakiet CAD do modelowania cyfrowego i renderingu
Pro/ENGINEER 4.0	CAx	PTC Corporate	3D PRO Sp. z o.o.	Parametryczny i dwukierunkowo zintegrowany system wspomagania procesów projektowych i wytwórczych
RADAN 08	CAD/CAM	Radan Computational Limited	CNS Solutions Sp. z o.o.	Projektowanie i wytwarzanie elementów blaszanych
SigmaNEST V7.0	CAD/CAM	SigmaTEK	DataComp Sp. z o.o.	Program do optymalizacji rozkładu elementów na arkuszu blachy (planowanie wykrawania, trasowania i cięcia)
Solid Edge	CAD	UGS Corp.	Des Art Sp. z o.o., GM System Sp. z o.o., KOM-ODLEW Sp. z o.o., Nicom Computers	Modeler średniego poziomu
SolidWorks	CAD	SolidWorks Corporation	Premium Technology, SolidExpert	Modeler średniego poziomu

SolidWorks i COSMOS	CAD/CAE	Dassault Systemes	CNS Solutions	Jw., dodatkowo wbudowany moduł MES
SolidWorks i SolidCAM	CAD/CAM	SolidCAM, SolidWorks Corporation	Premium Technology	SolidWorks z asocjatywnym modułem CAM
SolidWorks Office Premium (pakiet)	CAx	SolidWorks Corporation	Premium Technology	Pełny pakiet zawierający moduły do projektowania, obliczeń inżynierskich oraz przygotowania technologii
SprutCam	CAM	Sprut Technology Inc	Budikom KWP	Program do obsługi tokarek i frezarek CNC 2D; 2,5D; 3D; 3+1D; 3+2D z różnymi układami sterowania
SURFCAM	CAM	Licom System Ltd/Planit	CNS Solutions	System przygotowania obróbki dla maszyn CNC (2-. 3-. 4-i 5-osiowego toczenia oraz wycinania) WEDM*
T-FLEX PARAMETRIC CAD	CAx	TopSystems	NewTech Solutions Sp. z o.o.	Pakiet do modelowania najwyższego poziomu wyposażony w moduły do projektowania, obliczeń oraz przygotowania obróbki
TopSolid	CAx	Missler Software	TopSolution	Zintegrowany pakiet dla inżynierii mechanicznej; ma specjalistyczny moduł TopSolid'Wood dla branży meblarskiej (w tym m.in.

				bibliotekę okuć, uwzględnia specyfikę obróbki drewna na obrabiarkach CNC)
TurboCAD DeLuxe/ Professional 12 PL	CAD	IMSI	CAD-Projekt Wiktor Mielczarek	Pakiet do zaawansowanego modelowania cyfrowego
TurboCADCAM 3 PL	CAM	IMSI	CAD-Projekt Wiktor Mielczarek	Pakiet do komputerowego wspomagania wytwarzania
Źródła: www.gmsystem.pl, www.datacomp.com.pl, www.cns.pl, www.toruscadcam.com, www.autodesk.pl, www.aplikom.com.pl, www.evatronix.com.pl, www.bricsyspolska.pl, www.koltech.com.pl, www.cadprojekt.pl, www.edgecam.pl, www.nicom.pl, www.profprojekt.com.pl, www.hicad.pl, , www.siemens-plm.pl/products/unigraphics, www.sigmanest.info, www.budikom.pl, www.surfcam.pl, www.topsolid.pl (dostęp 8.07.2008)				

W przemyśle stosowanych jest kilkaset programów CAD. Jednak jedynie kilkanaście z nich jest szeroko rozpowszechnionych. Poniżej scharakteryzowano nieco bardziej szczegółowo wybrane z tabeli 19 najpopularniejsze programy CAD zestawione w porządku alfabetycznym.

- **AutoCAD** Producent: Autodesk (www.autodesk.com)
  Typ: CAD
  Krótki opis: program do modelowania 2D i 3D oraz opracowywania dokumentacji (grafiki inżynierskiej) w branżach mechanicznej, budowlanej, elektrycznej i innych. Jest najpopularniejszym na świecie narzędziem do projektowania i kreślenia. Może służyć jako programowalna platforma do automatyzacji złożonych zadań projektowych integrująca dane projektowe z firmowymi systemami informatycznymi. Na bazie AutoCAD opracowano wiele specjalistycznych systemów CAD dedykowanych dla różnych branż (np. AutoCAD Mechanical, AutoCAD Electrical, AutoCAD MEP[54], AutoCAD Architecture). AutoCAD ma otwartą architekturę umożliwiającą tworzenie specjalizowanych nakładek (np. Mebel-CAD[55], AutoPLANT itp.).
  Kernel: Autodesk ShapeManager
  Najnowsza wersja: AutoCAD 2009 z marca 2008 roku
  Natywny format pliku: *.dwg
- **AutoCAD Mechanical**
  Producent: Autodesk (www.autodesk.com)
  Typ: CAD
  Krótki opis: służy do tworzenia szkiców i rysunków 2D urządzeń mechanicznych

metodą FEature Based Modeling (vide podpunkt 3.5.5). Zawiera biblioteki elementów znormalizowanych. Umożliwia wykonywanie obliczeń wytrzymałościowych.
Kernel: Autodesk ShapeManager
Najnowsza wersja: AutoCAD Mechanical 2009 z marca 2008 roku
Natywny format pliku: *.dwg

- **Inventor**
  Producent: Autodesk (www.autodesk.com)
  Typ: CAD
  Krótki opis: parametryczny modeler bryłowy umożliwiający cyfrowe prototypowanie, półautomatyczną generację dokumentacji rysunkowej z trójwymiarowych modeli. Podstawowe moduły to: moduł do tworzenia części (dawniej .ipt, obecnie .dwg), moduł do tworzenia złożeń (.iam), moduł do tworzenia dokumentacji (.idw). Dodatkowo moduł do tworzenia części oferuje możliwość sprawdzenia wytrzymałościowego części, natomiast moduł do tworzenia złożeń – możliwość przeprowadzania symulacji montażu, tworzenia animacji i renderingu do prezentacji fotorealistycznych. Inventor jest systemem parametrycznym.
  Kernel: Autodesk ShapeManager
  Najnowsza wersja: Inventor 2009 z 2008 roku
  Natywne formaty plików: części – .dwg (.ipt); złożenia – .iam, rysunki – .idw
- **CATIA** Producent: Dassault SystÞmes (www.catia.com)
  Typ oprogramowania: CAD/CAM/CAE/PLM
  Krótki opis: zaawansowany parametryczny wielomodułowy system wspomagania prac inżynierskich CAD/CAM wspomagający projektowanie mechaniczne – od szkiców, przez rysunki detali, zdefiniowanie zespołów i wygenerowanie dokumentacji wykonawczej oraz wirtualne prototypowanie. Umożliwia wykonanie wirtualnych makiet oraz przeprowadzenie niezbędnych symulacji i obliczeń mających na celu zoptymalizowanie konstrukcji urządzenia. CATIA jest oferowana w trzech konfiguracjach, tzw. platformach, różniących się między sobą modułami składowymi (P1, P2, P3). Każdą z nich opracowuje się pod kątem różnych potrzeb użytkowników.
  Kernel: własny
  Najnowsza wersja: CATIA V5R18 z września 2007 roku
  Natywne formaty plików: części – .catpart; modele – .model); złożenia – .catproduct
- **IronCAD**
  Producent: Ironcad (www.ironcad.com)
  Typ oprogramowania: CAD
  Krótki opis: parametryczny program do modelowania bryłowego CSG i FBM dedykowany branży mechanicznej. Umożliwia tworzenie trójwymiarowych modeli cyfrowych powiązanych asocjatywnie z rysunkami wykonawczymi. Oferuje możliwości modelowania bezpośredniego (ang. *Direct Face Modeling*), renderingu, analizy kolizji w złożeniach.
  Kernel: własny

Najnowsza wersja: IronCAD Version 10 z grudnia 2007 roku
Natywne formaty plików: .ics, .icd, .icc

- **MicroStation** Producent: Bentley (www.bentley.com)
  Typ oprogramowania: CAD
  Krótki opis: modeler średniego poziomu stosowany w architekturze, budownictwie, geodezji, GIS[56], kartografii, mechanice, przemyśle i telekomunikacji.
  Kernel: własny
  Najnowsza wersja: MicroStation Athens z 2008 roku
  Natywne formaty plików: .dgn, .cel, .svf
- **Pro/Engineer** (Pro/E)
  Producent: PTC (www.ptc.com)
  Typ oprogramowania: CAD/CAM/CAE/PLM
  Krótki opis: modeler wysokiego poziomu stosowany w branży motoryzacyjnej, jest narzędziem służącym do kompleksowego wspomagania procesu projektowania produktu: od wstępnej jego koncepcji, aż po technologię wytwarzania.
  Kernel: Pro-Engineer (własny)
  Najnowsza wersja: Pro/ENGINEER Wildfire 4 z 2008 roku.
  Natywne formaty plików: .prt, .asm, .frm, .drw
- **Solid Edge**
  Producent: Siemens PLM Software (www.solid-edge.com)
  Typ oprogramowania: CAD/CAE
  Krótki opis: parametryczny system CAD/CAM służący do modelowania części i zespołów, zwłaszcza w przemyśle maszynowym. Jest skalowalny (zawiera specjalizowane moduły). Ma wbudowany system zarządzania dokumentacją (Solid Edge Insight) ułatwiający pracę grupową zgodnie z wymaganiami normy ISO 9000.
  Kernel: Parasolid
  Najnowsza wersja: Solid Edge V20 z lipca 2007 roku
  Natywne formaty plików: części – .par, złożenia – .asm, rysunki – .dft
- **SolidWorks** Producent: SolidWorks Corporation, część Dassault SystÞmes (www.solidworks.com)
  Typ oprogramowania: CAD/CAE
  Krótki opis: SolidWorks to modułowy rozbudowany system CAD, oferuje: (1) projektowanie mechaniczne (SolidWorks Office), (2) obliczenia wytrzymałościowe (CosmosWorks), (3) zarządzanie danymi (PDMWorks™), (4) narzędzia do komunikacji (eDrawings i in.), (5) moduły specjalistyczne (projektowanie połączeń (SolidWorks Toolbox), projektowanie konstrukcji rurowych (SolidWorks Routing) itp.
  Kernel: Parasolid
  Najnowsza wersja: SolidWorks 2008 z 2008 roku
  Natywne formaty plików: części – .sldprt, złożenia – .sldasm, rysunki – slddrw
- **UGS NX** Producent: Siemens PLM Software (www.siemens.com/ugs)
  Typ oprogramowania: CAD/CAM/CAE/PLM
  Krótki opis: system przeznaczony do zarządzania całym cyklem życia produktu.

Zawiera wiele specjalizowanych modułów. Moduł CAD przeznaczony jest do cyfrowego parametrycznego modelowania.
Kernel: Parasolid
Najnowsza wersja: NX 5 z kwietnia 2007 roku
Natywny format pliku: .prt

5.2. Kernele modelowania geometrycznego

Systemy CAx (CAD, CAM itp.) oparte są na dedykowanym do tego celu jądrze (ang. *kernel*), w którym realizowane są wszystkie operacje wykonywane przez system. Producentów oprogramowania można podzielić na dwie grupy: pierwsza korzysta z własnego kernela (np. Autodesk), druga z kerneli uniwersalnych. Praktyczne zastosowanie mają dwa kernele uniwersalne: ACIS (prod. Spatial) oraz Parasolid→ (prod. Siemens PLM Solutions). Istnieje jeszcze kilka innych jąder stosowanych w CAD, zestawiono je w tabeli 20, jednak mają o wiele mniejsze zastosowanie.

Oprogramowanie CAD funkcjonuje jak interfejs obsługujący kernel modelowania geometrycznego. Oprogramowanie bazujące na tym samym jądrze jest ze sobą kompatybilne, znajomość kernela konkretnego systemu CAD odgrywa zatem ważną rolę w przypadku konieczności przenoszenia danych pomiędzy różnymi systemami CAD[57].

Tabela 20. Ważniejsze kernele CAx

Kernel	**Najnowsza wersja**	**Producent**	**Strona WWW producenta**
ACIS 3D Toolkit	Release 18.0 (październik 2007)	Spatial/Dassault Systemes	www.spatial.com
Parasolid	Version 19.0 (luty 2007)	Siemens PLM Solutions	www.phn.automation.siemens.com (www.parasolid.com)
Open CASCADE	Version 6.2 (marzec 2007)	Matra Datavision	www.opencascade.org
SMLib^{Tm}	Version 7.5 (grudzień 2007)	Solid Modeling Solutions	www.smlib.com
thinkdesign kernel	Version 9.0 (styczeń 2008)	think? Inc.	www.think3.com

ACIS

Formatem natywnym pliku jądra ACIS jest .sat (ewentualnie .acis lub .sab). Kernel ACIS to zestaw procedur napisanych w języku C++, zorientowanych obiektowo. Zawiera 35 bibliotek DLL i integruje modelowanie krawędziowe, powierzchniowe i bryłowe w topologii powielonej oraz niepowielonej.

Na bazie kernela ACIS zbudowanych jest ponad 220 aplikacji CAx, m.in.: CADKEY (CADKEY Corp.), IronCAD (Visionary Design Systems), MSC/Nastran i Working Model FEA (MSC.Software), Vellum Solids (Ashlar); aplikacje firmowe (AlliedSignal, Daimler-Benz, Ford, Lockheed Martin, Northrop Grumman, Sony). Programy firmy Autodesk: AutoCAD, Mechanical Desktop, Inventor, wykorzystywały jądro ACIS do 2000 roku. Obecnie te popularne aplikacje bazują na jądrze ShapeManager opartym na ACIS 7.

Parasolid

Formatami plików jądra Parasolid są .x_b oraz .x_t. Według „Fact Sheet" opublikowanego na stronie producenta[58] 40% aplikacji CAD korzysta z jądra Parasolid (ok. 870 000 instalacji na świecie w 2008 roku)[59]. Parasolid jest dostarczany w postaci biblioteki ok. 750 procedur dedykowanych do modelowania w systemach CAD/CAM/CAE i innych specjalistycznych aplikacjach. Na kernelu Parasolid zbudowanych jest ponad 240 aplikacji CAx, poza wymienionymi w tabeli 21 aplikacje firmowe (Boeinga, General Motors, Hitachi Research, Mitsubishi Motors, Pratt & Whitney, British Aerospace i General Electric).

Tabela 21. Zestawienie ważniejszych aplikacji CAx zbudowanych na kernelach ACIS i Parasolid

Jadro	**ACIS**	**Parasolid**
Systemy CAD	Do 2000 roku AutoCAD 2D/3D CAD Alibre Design Iron CAD MegaCAD SpaceClaim TurboCAD	CADkey CATIA Microstation NX (Unigraphics) Solid Edge SolidWorks T-Flex Parametric CAD

Porównanie tolerancji geometrycznej kerneli ACIS oraz Parasolid zamieszczono w tabeli 22.

Tabela 22. Porównanie granicznych wielkości modeli dla kerneli ACIS i Parasolid

Jednostka bazowa	**ACIS**		**Parasolid**	
	min.	maks.	min.	maks.
1 m	10^{-6}m	10^{4}m	10^{-8} m	10^{3}m

1 cm	10^{-8} m	10^{2}m	10^{-10}m	10 m
1 nnn	10^{-9} m	10 m	10^{-11} m	1 m

5.3. Wymagania sprzętowe systemów CAD

Wymagania sprzętowe oprogramowania CAD bardzo ściśle zależą od liczby elementów składowych w projektowanych zespołach. W szeroko stosowanym modelowaniu opartym na cechach konstrukcyjnych zmiana wartości jednego parametru cechy konstrukcyjnej (np. zmiana głębokości otworu) powoduje konieczność przebudowania wszystkich obiektów potomnych i odświeżenia całego drzewa konstrukcji. W cyfrowych modelach składających się z kilkuset elementów taka operacja jest kosztowna obliczeniowo.

Wybrane wymagania sprzętowe wobec programów CAD przedstawia tabela 23. Kluczowa dla tego typu programów jest pojemność pamięci operacyjnej RAM.

Tabela 23. Przykładowe wymagania sprzętowe wybranych aplikacji CAx dla systemu operacyjnego Windows XP 64 bit (według danych producentów, stan na kwiecień 2008 roku)

Oprogramowanie	**Wersja na rok**	**Producent**	**Zalecany procesor**	**RAM**	**Wolne miejsce na pliki**
CATIA V5	2008	Dassault Systemes	Intel Xeon EM64T lub AMD Optcron (min. 1700 GHz)	Min. 4 Gb	2.5 Gb
Inventor 2009	2008	Autodesk	Intel (Pentium 4), AMD (Athlon 64, Opteron) (min. 2 GHz)	Min. 1 Gb (do 1000 części)	3,5 Gb
SolidWorks 2008	2008	SolidWorks Corporation (część Dassault Systemes)	Intel (Pentium, Xeon, Core); AMD (Athlon, Opteron, Turion) (nie sprecyzowano min. częstotliwości)	Min. 1 Gb Rekom. >2Gb	Brak danych
ProEnginer Wildfire 4	2008	Parametrio Technology Corporation (PTC)	Intel (Pentium/Xeon/Core Duo/Core 2 Duo); AMD (Opteron) (nie	Min. 256 Mb Rekom.>l Gb	2,0 Gb

			sprecyzowano min. częstotliwości)		

5.4. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 5.

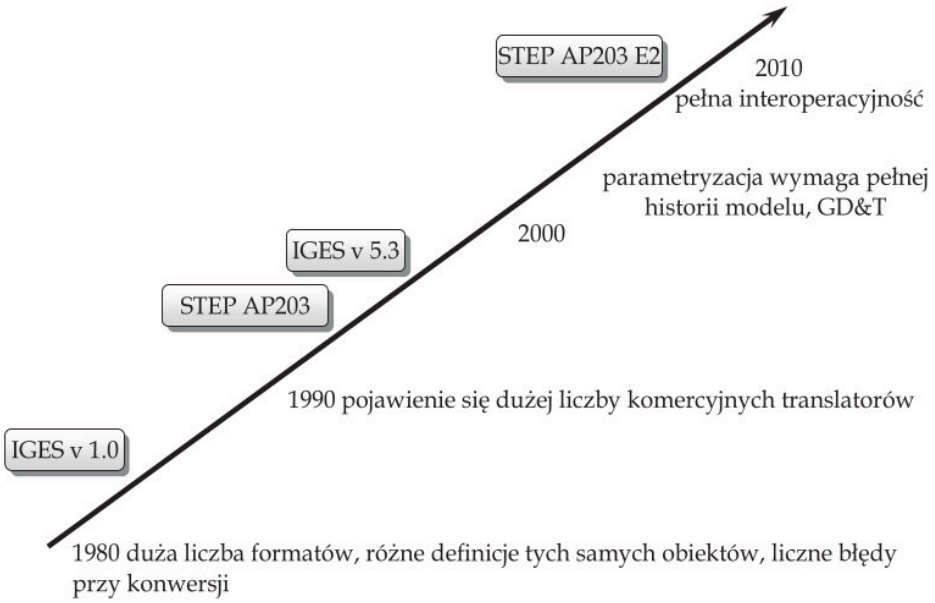
1. Przedstaw ogólną klasyfikację systemów CAD ze względu na zakres wspomagania prac inżynierskich.
2. Wymień ważniejsze modelery średniego poziomu.
3. Wymień ważniejsze modelery najwyższego poziomu.
4. Wymień kilka przykładów ważniejszych systemów CAD dostępnych i stosowanych w Polsce.
5. Czym charakteryzują się tzw. programy specjalizowane CAD?
6. Podaj natywne formaty plików dla kernela ACIS.
7. Podaj natywne formaty plików dla kernela Parasolid.
8. Jaki czynnik związany z wykonywanym projektem ma największy wpływ na wymagania sprzętowe wobec oprogramowania CAD?

6. Uwagi o wymianie danych

6.1. O potrzebie wymiany danych

W przypadku złożonych zadań inżynierskich pojawia się potrzeba zaangażowania do procesu projektowo-konstrukcyjnego specjalistów z wielu dziedzin techniki. Każdy z nich realizuje cząstkę procesu stosownie do swojej specjalności, korzystając z różnych systemów CAD, co z kolei powoduje konieczność zapewnienia bezstratnego sposobu wymiany danych. Dodatkowo rozproszenie zadań inżynierskich często wiąże się z rozproszeniem ich wykonawców, pliki przesyłane za pomocą Internetu, otwierane i edytowane w różnych programach muszą mieć stosunkowo niewielki rozmiar.

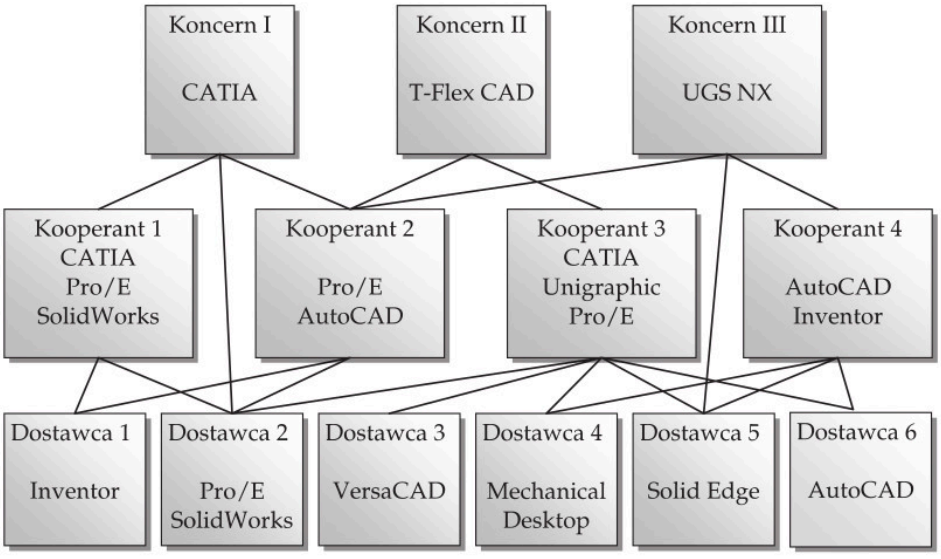
Problemy z wymianą danych istnieją od początków komputerowego wspomagania projektowania. Historię wymiany danych przedstawia schematycznie rysunek 59.


STEP AP203 E2
2010
pełna interoperacyjność
parametryzacja wymaga pełnej historii modelu, GD&T
2000
IGES v 5.3
STEP AP203
1990 pojawienie się dużej liczby komercyjnych translatorów
IGES v 1.0
1980 duża liczba formatów, różne definicje tych samych obiektów, liczne błędy przy konwersji

Rysunek 59. Historia wymiany danych

W latach osiemdziesiątych XX wieku współpraca pomiędzy programami opartymi o różne kernele była niemożliwa, nie istniały uniwersalne formaty wymiany danych, a obiekty geometryczne były odmiennie definiowane. Rozwój oprogramowania CAx zmierza w kierunku uzyskania pełnej interoperacyjności.

Typową przemysłową siatkę powiązań pomiędzy kooperantami przedstawiono na rysunku 60. Wyróżniono trzy grupy przedsiębiorstw różniących się rozmiarami, największe „koncerny", mniejszych „kooperantów" oraz najmniejszych „dostawców". W grupie dużych koncernów wdrożony jest najczęściej jeden duży system CAD/CAM/PLM zarządzający wszystkimi etapami projektowania, produkowania i serwisowania produktu. W grupie mniejszych kooperantów istnieje duża dywersyfikacja używanego oprogramowania, najczęściej używane są modelery średniego poziomu. W grupie dostawców znajdują się małe firmy dysponujące najczęściej jednym programem CAD, może to być program CAD/CAM lub zwykły system do wykonywania dokumentacji rysunkowej (CADD). Taka złożona struktura, duża liczba oprogramowania może powodować problemy przy współdzieleniu danych.



Rysunek 60. Typowa przemysłowa siatka powiązań

Potrzeba wymiany danych wynika z dużej liczby programów do wspomagania prac inżynierskich stosowanych w przemyśle. Rezultatem szybkiego rozwoju rynku CAD była znaczna niejednorodność aplikacji, duża liczba formatów zapisu, interfejsów, jąder modelerów geometrycznych, nazw i standardów. Stosowane oprogramowanie różni się rodzajem i zakresem wspomaganych zadań inżynierskich. Wynika to z wielkości nakładów przeznaczanych na zakup i eksploatację oprogramowania przez poszczególne przedsiębiorstwa. Według wyników badań przeprowadzonych przez firmę Kubotek (USA) wśród użytkowników oprogramowania CAD w firmach zatrudniających więcej niż 500 osób 26% respondentów odpowiedziało, że używają pięciu lub więcej różnych programów CAD (60% używa trzech lub czterech). Jedynie 6% respondentów odpowiedziało, że zawsze otrzymują modele ze źródeł zewnętrznych w swoim ulubionym formacie. Na podstawie badań stwierdzono również, że skala, w jakiej projektanci stykają się z problemami multi-CAD, zależy w znacznym stopniu od wielkości zatrudniającego ich przedsiębiorstwa oraz od rodzaju przemysłu, na którego rzecz pracują. Im mniejsze przedsiębiorstwo, tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia konieczności wymiany danych. Głównym wnioskiem wynikającym z badania było „zgromadzenie danych i stwierdzenie braku jakiegokolwiek standardowego formatu". Respondenci ankiety w liczbie 1253 osób wymienili 42 różne pakiety oprogramowania jako ich „podstawowe narzędzie CAD". Nawet najpopularniejsze pakiety (różne wersje oprogramowania Autodesk) zostały wymienione tylko przez 30% respondentów [Design News Polska 2006].

6.2. Wybrane problemy związane z wymianą danych

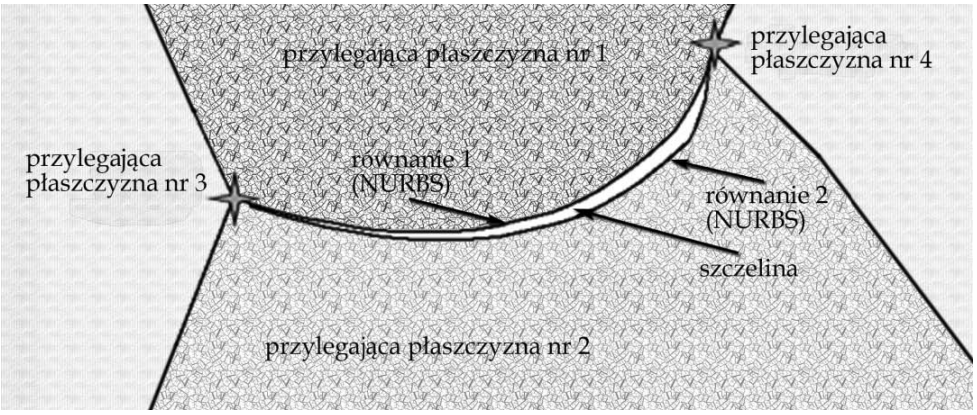
Podstawową informacją we wszystkich formatach plików CAD-owskich[60] jest układ elementarnych obiektów geometrycznych płaskich i przestrzennych: prymitywy[61] oraz powierzchnie i krzywe zapisane równaniami (vide podpunkt 2.2). W najczęściej występującym wypadku translacji modeli utworzonych metodą FBM, opisaną w podpunkcie 3.5.6, warunkiem bezbłędnej konwersji danych pomiędzy różnymi programami CAD są:

- znaczne podobieństwo pomiędzy dwoma systemami,
- ten sam poziom szczegółowości informacji możliwej do zapisania w formacie docelowym (szczególnie dotyczy to danych dodatkowych, np. informacji o tolerancjach geometrycznych, adnotacji itp.),
- istnienie w obu programach tych samych obiektów (cech konstrukcyjnych – ang. *features*),
- takie same wartości stałych materiałowych (po konwersji mogą ulec zmianie np. przypisane kolory, masy poszczególnych części itp.).

W poszczególnych programach CAD istnieje wiele wzajemnie niekompatybilnych cech konstrukcyjnych (ang. *features*) dodatkowo nawet w przypadku tych samych cech stosowane są różne metody ich konstruowania (np. sfera może być reprezentowana jako całość lub jako dwie półsfery). Wynikiem braku kompatybilności najczęściej jest niemożność lub bardzo ograniczony zakres możliwości modyfikacji obiektu zaimportowanego z jednego systemu do drugiego. Model przestrzenny przeniesiony między aplikacjami posługującymi się niekompatybilnymi cechami konstrukcyjnymi traci swoje drzewo konstrukcji i przez to możliwości jego modyfikacji są bardzo ograniczone.

Inny problem stanowią różne algorytmy zapisu (interpolacji) krzywych i ściśle z tym związane zagadnienia tolerancji wymiarowych obiektów. Algorytmy obliczeniowe tworzące obiekty geometryczne na podstawie równań są w każdym systemie inne, korzystają również z różnych wartości liczbowych tolerancji geometrycznych. Po konwersji może się okazać, że dwie krzywe,

na przykład krawędzie dwóch sąsiadujących płatów powierzchni, nie są współliniowe (maksymalna odległość pomiędzy nimi jest większa od tolerancji wymiarowej przyjętej przez producenta programu CAD). Model powierzchniowy zbudowany z kilku czy kilkunastu płatów powierzchni może być zamknięty (bez szczelin) w jednym systemie CAD i jednocześnie otwarty (ze szczelinami) w innym – nawet jeżeli jest otwierany w formacie natywnym, bez konwersji. Zależy to od przyjętych w programie tolerancji geometrycznych. Przykład braku współliniowości krawędzi powierzchni opisanych różnymi równaniami przedstawia rysunek 61.



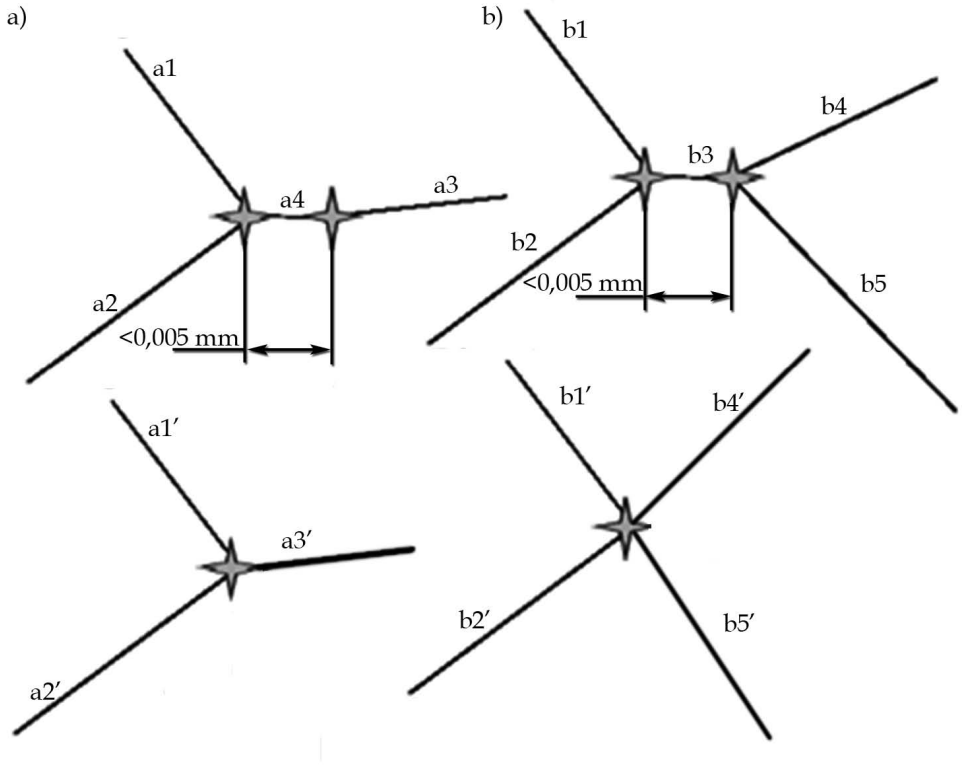
Rysunek 61. Niewspółliniowość krawędzi po konwersji

Zazwyczaj po eksporcie modelu z systemu A do systemu B bardzo prawdopodobne jest pojawienie się również innych zmian w jego geometrii. Takie zmiany nie zawsze muszą być niekorzystne. Utrata drobnych elementów, nieistotnych z punktu widzenia późniejszej technologii produkcji rzeczywistego obiektu, może być korzystna. Warto zauważyć, że w praktyce idealny cyfrowy model geometryczny rzeczywistej części nie istnieje[62]. Poszczególne powierzchnie i krawędzie krzywoliniowe są pewnym przybliżeniem założonego matematycznego ideału. Perfekcyjny cyfrowy model geometryczny nie ma praktycznego uzasadnienia, ponieważ w rzeczywistości nigdy nie uda się uzyskać np. idealnej styczności w trakcie obróbki. Chęć zbliżenia się do idealnego modelu przestrzennego, w którym wszystkie tolerancje geometryczne modelu cyfrowego są równe

zeru, oznacza zastosowanie bardziej złożonych algorytmów obliczeniowych, które są kosztowne obliczeniowo. W praktyce przemysłowej w przypadku budowy maszyn tolerancje rzędu 0,10 – 0,01 mm są w zupełności wystarczające (oczywiście zawsze można podać zastosowania specjalne, w których tolerancja wymiarowa osiąga mniejsze wartości). W oprogramowaniu CAD tolerancje geometryczne modeli są zazwyczaj 10 – 100 razy większe od uzyskiwanych tolerancji technologicznych, co w zupełności wystarcza.

W modelowaniu cyfrowym modeler CAD zakłada, że dwie krzywe przecinają się, jeżeli najmniejsza odległość między tymi krzywymi jest mniejsza od tzw. tolerancji przecinania się krzywych, a dwie powierzchnie są wzajemnie styczne, jeżeli mają wspólną krawędź i w każdym punkcie tej krawędzi kąt pomiędzy kierunkami normalnymi do obu powierzchni jest mniejszy od tolerancji styczności[63].

Na rysunku 62 przedstawiono dwa przykłady utraty nieistotnych szczegółów geometrycznych, w tym przypadku przyjęta tolerancja geometryczna w trakcie konwersji była mniejsza od 0,005 mm.



Rysunek 62. Utrata nieistotnych szczegółów geometrycznych o wymiarach mniejszych od tolerancji geometrycznej modelu (na górze przed konwersją, na dole po konwersji): a) połączenie dwóch krawędzi (a4 z a3); b) usunięcie krawędzi (b3)

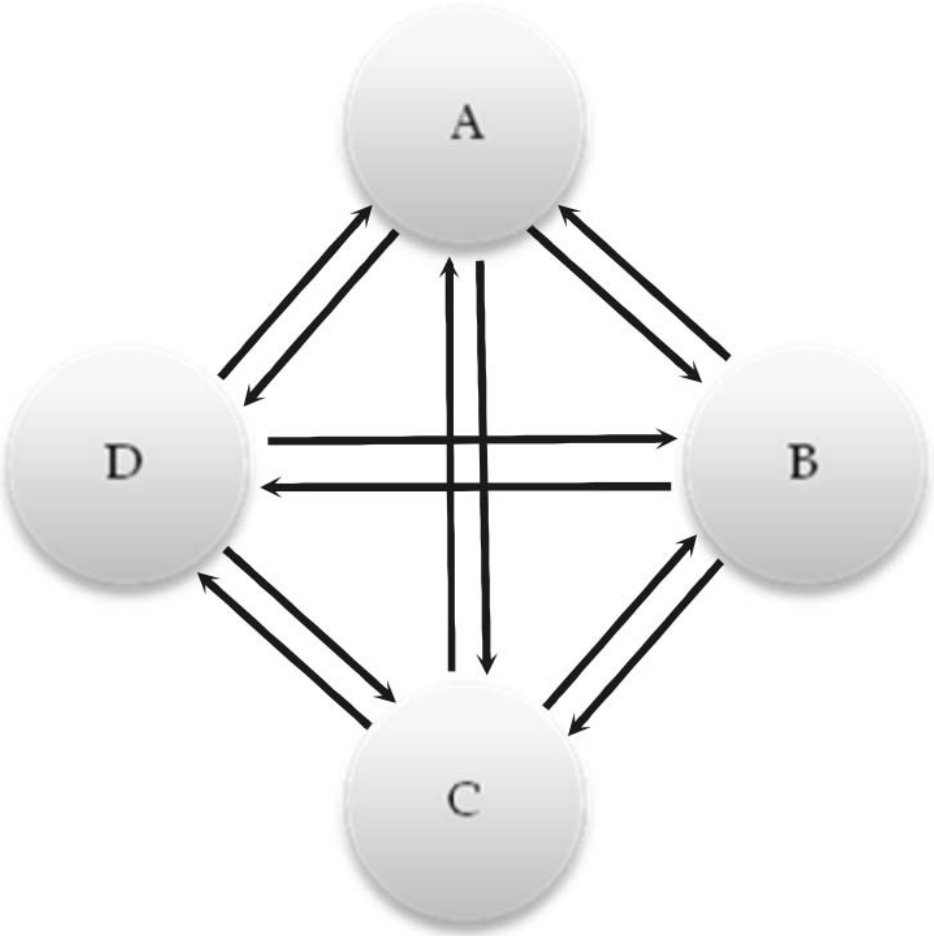
6.3. Techniki wymiany danych

Istnieją trzy główne sposoby wymiany danych pomiędzy programami CAD polegające na zastosowaniu:

- wbudowanych konwerterów producenta oprogramowania lub zastosowaniu dokupionych translatorów bezpośrednich (np. PS-Exchange),
- funkcji jądra graficznego (vide podpunkt 5.2),
- formatu neutralnego.

Zalecana kolejność stosowania mechanizmów konwersji (importu i eksportu) jest następująca: (1) konwertery producenta (w niektórych przypadkach trzeba je dokupić), (2) funkcje jądra (najlepsze rezultaty uzyskuje się w przypadku, gdy oba programy CAD oparte są na tym samym kernelu), (3) formaty neutralne.

Wbudowane do programów CAD konwertery producentów pozwalają na import lub eksport pliku w wybranym formacie. Nie zawsze jednak istnieje możliwość wykorzystania konwertera producenta oprogramowania. Warto zauważyć, że do uzyskania pełnej wymienialności danych jedynie dla czterech różnych systemów CAD zachodzi konieczność zbudowania aż dwunastu różnych konwerterów (zastosowanie piątego systemu wymaga dołączenia dodatkowo kolejnych ośmiu translatorów). Na rysunku 63 przedstawiono schematycznie wymianę danych między czterema systemami CAD (oznaczonymi literami A – D).



Rysunek 63. Pełna interoperacyjność między czterema systemami CAD osiągana za pomocą dwunastu konwerterów

Pełna interoperacyjność pomiędzy sześcioma systemami CAD wymaga zastosowania trzydziestu konwerterów (por. rys. 64).

Możliwości eksportu i importu danych za pomocą wbudowanych konwerterów przez wybrane programy CAD przedstawia tabela 24.

Przykład możliwości konwertowania dla oprogramowania SolidWorks przedstawia tabela 25, natomiast opcje konwertowania dla oprogramowania Solid Edge v20 prezentuje tabela 26.

Tabela 24. Możliwości importu i eksportu formatów plików przez wybrane programy CAD

Program (producent)	**Import**	**Eksport**
Alibre Design (Alibre Inc.)	STP, STEP. STE. DWG, DXF. IGS, 3DM	STL. IGS. SAT. STP (STEP AP 203 I 214). DXF. DWG
AutoCAD Mechanical (Autodesk)	IPT, IAM, DWG. DWF,DXF, 3DS, SAT, IGES. STEP, DXB. WMF, BMP. OBIEKTY OLE; RASTRY (TIFF. BMP, JPG)	DWG. DXF. IGES. STEP, DWF, SAT, 3DS. EPS. BMP
Inventor (Autodesk)	DWG, DXF, IGES. SAT, STEP. STL, IPT, IAM, PRT, IDE	DWG. DWF. DXF. IGES. SAT. STEP. STL. XGL. ZGL. AVI. IPT, IAM. IDW
CATIA V4/V5 (Dassault Systemes)	CGM, GL, GL2, HPGL (VECTOR T LES), XML, ACT, ASM. BDF, BRD, DWG, DXF, IDF. IG2. IGS, PDB, STBOM, STEP. STP, TDG, rastry (PNG, BMP). RLE, DIB	STP. IGS. CGR. EXE. HSF, STBOM. TXT. WRL. CGO. STL. CGM. HPGL2. PS. PDF. TIF. JPEG. VRML. AVI, MOV. MPEG. MOVIE. XML. PCX, TGA. WPG. WMF. DCX(INTEL), PICT. CALS. XBM. IOCA (*.iss), ILBM (*.iff). CLIP (WINDOWS CLIPBOARD). BROOKTROUT (*.brk), XPM. XWD. RAST - Sun raster Image (*.ras). PSD. SCITEX (*.sct), HP-GL2 RTL
IntelliCAD (IntelliCAD Technology Consortium)	DXF, DWG, DWT ,DWF	DXF. DWG. DWT .DWF

Pro/ENGINEER (Parametrio Technology Corporation)	IGES, SET, VDA, DXF, DWG. CDM, IBL, PTS, STEP, STL. WRL, WAVEFRONT, ECAD. ACIS, Parasolid, ICEM, IDEAS, CATIA, Unigraphics, inne	IGES. SET. VDA. DXF, DWG, STEP, STL. WAVEFRONT, ECAD, Parasolid, IDEAS. CATIA, Unigraphics, Patran, Cosmos. Inventor. VRML, TIFF, JPG, PIC. inne
Unigraphics (Siemens PLM Software)	CGM, VRML, STL, IGES. STP. STEP, IMW, AC, x_t, x_b. CATIA, DWG, DXF	CGM. STL, PLY, VRLM, IGES, STP, STEP. x_t. x_b, CATIA, DWG, DXF

Tabela 25. Tabela wymiany danych dla SolidWorks Office Professional 2008 (opracowano na podstawie www.solidworks.pl, 19.03.2008)

Formaty źródłowe	
***.sldprt** (części); ***.sldasm** (złożenia) ***.slddrw** (widoki)	
Formaty innych aplikacji CAD	
Autodesk 2D DXF/DWG (*.dxf, *.dwg)	Import i eksport AutoCAD (wersje od 12 do 2002)
Autodesk Mechanical Desktop (*.dwg)	Import
Autodesk Inventor (*.ipt)	Import
Pro/Engineer (*.prt, *.asm, *.xpr, *.xas)	Import i eksport
Soubory CADKEY (*.prt)	Import
NX (Unigraphics) (*.prt)	Import
Solid Edge (*.prt, *.asm)	Import

IDF (*.emn, *.brd, *.bdf, *.idb)	Import
VRML (*.wrl)	Import i eksport
Adobe Illustrator (*.ai)	Import
CATIA Graphics (*.cgr)	Eksport
Uniwersalne formaty wymiany danych/formaty kerneli	
Initial Graphics Exchange Specification (*.igs)	Import i eksport
STEP (*.step)	Import i eksport dla AP203, import dla AP214
STL (*.stl)	Import i eksport (dla technologii rapid prototyping, konwersja stratna)
VDAFS (*.vda)	Import i eksport (modeli powierzchniowych dla przemysłu samochodowego)
Autodesk 3D DXF (*.dxf)	Import
Kernel ACIS (*.sat)	Import i eksport
Kernel Parasolid (*.x t. *.x b)	Import i eksport
Publikacja (konwersja stratna)	
HCG (*.hcg)	Eksport na potrzeby stron internetowych
HOOPS HSF (.hsf)	Eksport na potrzeby stron internetowych
TIF (*.tif)	Eksport
JPEG (*.jpeg)	Eksport
Adobe Portable Document Format (*.pdf)	Eksport

Tabela 26. Tabela wymiany danych dla Solid Edge v20 (opracowano na podstawie www.solidedge.nicom.pl, 20.05.2008)

Formaty natywne (źródłowe)	
***.par** (części); ***.asm** (złożenia) ***.psm** (dokumenty)	
Formaty innych aplikacji CAD	
AutoCAD (*.DWG)	Import i eksport AutoCAD (wersje od 12 do 2007)
CATIA v5 części (*.catpart) (*.model) CATIA v5 złożenia (*.catproduct)	Import
CATIA v4 części (*.model)	Import i eksport
MicroStation (*.dgn)	Import i eksport
SolidWorks (*.sldprt)	Import
Unigraphics (*.prt)	Import
części Pro/E (*.prt.*)	Import
EMS (*.ems)	Import i eksport
MDS (*.mds)	Import
Uniwersalne formaty wymiany danych/formaty kerneli	
Initial Graphics Exchange Specification (*.igs)	Import i eksport
STEP (.step)	Import i eksport dla AP203. Import dla AP214
STL (*.stl)	Import i eksport (dla technologii rapid prototyping, konwersja stratna)
Autodesk 3D DXF (*.dxf)	Import i export
Kernel ACIS (*.sat)	Import i eksport
Kernel Parasolid (*.x t, *.x b)	Import i eksport
Publikacja (konwersja stratna)	

ProductsVision (*.jt)	Eksport
XML (*.plmxml)	Eksport i import
UG Bookmark (*.bkm)	Eksport

Drugim sposobem wymiany danych jest zastosowanie możliwości, jakie dają jądra graficzne (kernele). Funkcje jąder graficznych (np. Parasolid i ACIS) zawierają operacje transferu baz danych graficznych. Wymiana odbywa się przez neutralne formaty kerneli (tabela 27). Ważniejsze kernele zostały opisane szerzej w podpunkcie 5.2.

Tabela 27. Formaty wymiany danych wybranych kerneli CAD

Kernel	**Rozszerzenie**
ACIS	*.sat, *.acis. *.sab
Parasolid	*.x t. *.x b

Trzecim stosowanym sposobem wymiany danych jest zastosowanie tzw. formatów neutralnych. Istnieją dwa podstawowe, tzw. neutralne formaty wymiany danych: (1) IGES, Initial Graphics Exchange Specification - norma ANSI, oraz (2) STEP Standard for the Exchange of Product model data - norma ISO. Pewnego rodzaju neutralnym formatem wymiany danych jest format VDA, ma jednak duże ograniczenia. Wybrane neutralne formaty wymiany danych zestawiono w tabeli 28.

Tabela 28. Neutralne formaty wymiany danych CAD

Format	**Rozszerzenie**	**Uwagi**
STEP (Standard for the Exchange of Product model data-ISO 10303)	*.stp, *.step	Modele brył implementowane, nowsze wersje zawierają także definicje siatki (język

		definicji EXPRESS - ASCII), niektóre informacje dotyczące warstw i parametryzacji mogą być utracone
IGES (Initial Graphics Exchange Specification)	*.igs	Format nie jest rozwijany (*.igs - z ograniczeniami, zoptymalizowany do użytku w przemyśle motoryzacyjnym)
	*.iges	
VDA-FS (Vereinung Deutsche Automobilindustrie Flachen Schnitts telle)	*.vda	Format nie jest rozwijany. Służy do eksportu modeli powierzchniowych (ostatnia edycja VDA 6.1 pochodzi z 1999 roku)

6.4. Formaty uniwersalne IGES i STEP

6.4.1. IGES

IGES (Initial Graphic Exchange Standard) został opracowany w 1979 roku na potrzeby branży lotniczej przez firmy Boeing, General Electric i NIST. Pierwsza wersja IGES była przeznaczona do wymiany rysunków, w skład których wchodziła geometria 2D i 3D. W zakresie 3D implementowane były tylko modele krawędziowe. Wkrótce format został przyjęty przez inne firmy i stał się standardem przemysłowym. W ostatniej wersji format IGES zapewnia transfer:

- geometrii 2D,
- geometrii 3D, w tym powierzchni NURBS i uciętych,
- modeli B-rep,

- modeli CSG,
- adnotacji (tekst, wymiary itd.),
- struktur (zdefiniowane rzutnie itd.),
- atrybutów oraz właściwości.

Podstawową zaletą IGES była dobra zdolność opisu powierzchni opartych na krzywych typu NURBS. W tym formacie bryły definiowane są przez powierzchnie, w związku z tym modele brył CGS często okazywały się niemożliwe do implementacji. Format był rozwijany w latach 1979 – 1996, jego ostatnia opublikowana specyfikacja oznaczona jako „Version 5.3” pochodzi z września 1996 roku. Format IGES jest obecnie coraz rzadziej stosowany. Strukturę pliku IGES przedstawia tabela 29.

Tabela 29. Struktura pliku IGES (opis w tekście)

S 1	S
1H,,1H;,5HF100X,9HF100X.IGS,13H{unspecified},13H{unspecified},32,38,15, G 1	G
308,15,5HF100X,1.,1,2HIN,4,0.01333,13H990612.102427,0.0001,8., G 2	
31HIGES Version 5.6 Edit Committee,9HIPO/USPRO,11,0,13H900123.223747,G 3	
106 1 1 00000000D 1	D
106 2 2 11 D 2	
212 3 1 00000100D 3	
404 24 00000300D 31	
404 2 1 D 32	
106,1,5,0.,3.0753,2.9407,3.0753,3.4407,3.1086,3.2407,3.0419, 1P 1	P
3.2407,3.0753,3.4407; 1P 2	
212,1,1,0.1396,0.125,1,1.5707963267949,0.,0,0,4.254,1.3875,0., 3P 3	
1HA; 3P 4	
212,1,1,0.1342,0.125,1,1.5707963267949,0.,0,0,4.4971,2.5936,0., 5P 5	
1HB; 5P 6	
212,1,2,0.264,0.125,1,1.5707963267949,0.,0,0,3.2821,2.6809,0., 7P 7	
2HXT; 7P 8	
212,1,9,1.7867,0.2,1,1.5707963267949,0.,0,0,0.7439,0.5717,0., 9P 9	
9HEXAMPLE 1; 9P 10	
212,1,9,1.8206,0.2,1,1.5707963267949,0.,0,0,3.6811,0.5542,0., 11P 11	
9HEXAMPLE 2; 11P 12	
212,1,2,0.2664,0.125,1,1.5707963267949,0.,0,0,2.7266,3.1323,0., 13P 13	
2HYT; 13P 14	
106,1,5,0.,3.0762,2.9386,3.5762,2.9386,3.3762,2.9053,3.3762, 15P 15	
2.9719,3.5762,2.9386; 15P 16	
110,3.0753,2.9407,0.,3.0753,3.4407,0.; 17P 17	
100,0.,4.55,2.0471,4.1802,1.2541,4.55,2.9221; 19P 18	
100,0.,4.55,2.0471,4.55,2.9221,4.1802,1.2541; 21P 19	
100,0.,1.6506,2.082,2.5256,2.082,2.5256,2.082; 23P 20	
110,3.0762,2.9386,0.,3.5762,2.9386,0.; 25P 21	
406,2,6.,8.; 27P 22	
410,1,1.,0,0,0,0,0,0; 29P 23	
404,1,29,0.,0.,0,0,1,27; 31P 24	
S 1G 3D 32P 24 T 1	T

Plik IGES składa się z pięciu sekcji, w tabeli 29 oznaczono je literami: S – Start, G – Global section, D – Directory entry, P – Parameter Data, T – Terminate. Z drugiej linii sekcji G można wyczytać, że jednostkami pliku modelu są cale (oznaczenie „IN”), plik utworzono 12 czerwca 1999 roku (ciąg znaków „990612”) o godzinie 10:27 podanej w systemie dwudziestoczterogodzinnym (ciąg znaków „102427”). W trzeciej linii znajduje się oznaczenie wersji pliku IGES („Version 5.6”).

6.4.2. STEP

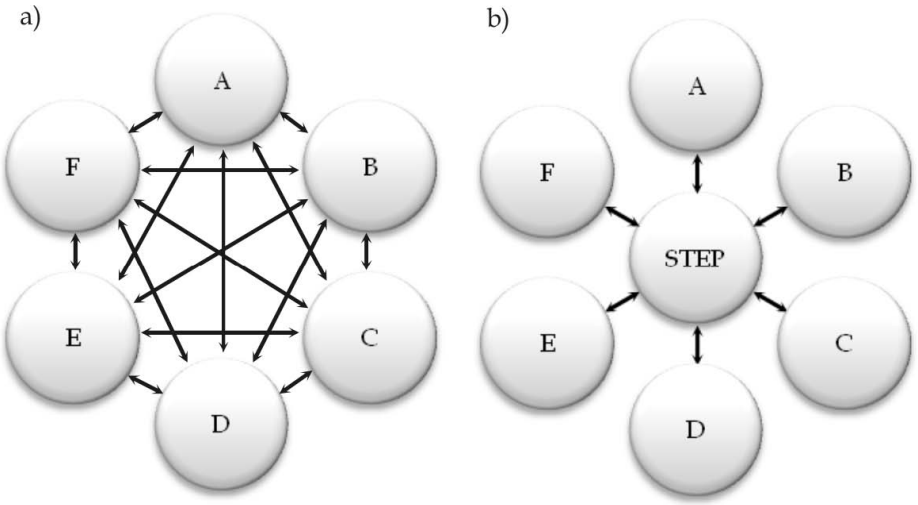
Format STEP (STandard for the Exchange of Product model data) zaczęto opracowywać w 1983 roku. STEP, przeznaczony do wymiany danych między różnymi podsystemami informatycznymi stosowanymi w przedsiębiorstwie (moduły CAD, CAM, CAE i PDM), jest w pewnym sensie następcą formatów IGES i VDA-FS, ma architekturę modułową. Zaprojektowano go do:

- wymiany i współdzielenia danych,
- długoterminowej archiwizacji,
- integracji przedsiębiorstwa (OEM i kooperantów),
- przenoszenia informacji o: geometrii i topologii, montażowej, rysunkowej, strukturze produktu, parametrycznych cechach konstrukcyjnych, tolerancjach kształtu i chropowatości, możliwych konfiguracjach, materiałach, BOM itp.,
- zastosowania w wielu branżach przemysłowych: maszynowej, meblarskiej, lotniczej, samochodowej, elektronicznej, budowlanej itp.

STEP jest rozwijany przez komitet techniczny TC 184 Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej ISO, określa go norma ISO 10303 o oficjalnym tytule „Industrial automation systems and integration – Product data representation and Exchange”[64]. W przedmowie do jej wszystkich arkuszy napisano: „ISO 10303 jest międzynarodowym standardem zapisu danych o produkcie przetwarzanych techniką komputerową; jego głównym celem jest dostarczenie neutralnego formatu do opisu produktu w trakcie całego jego cyklu życia. Format jest przydatny nie tylko do neutralnej wymiany plików, ale również jako podstawa do rozwoju współdzielonych baz danych o produktach oraz jako podstawa do archiwizacji”.

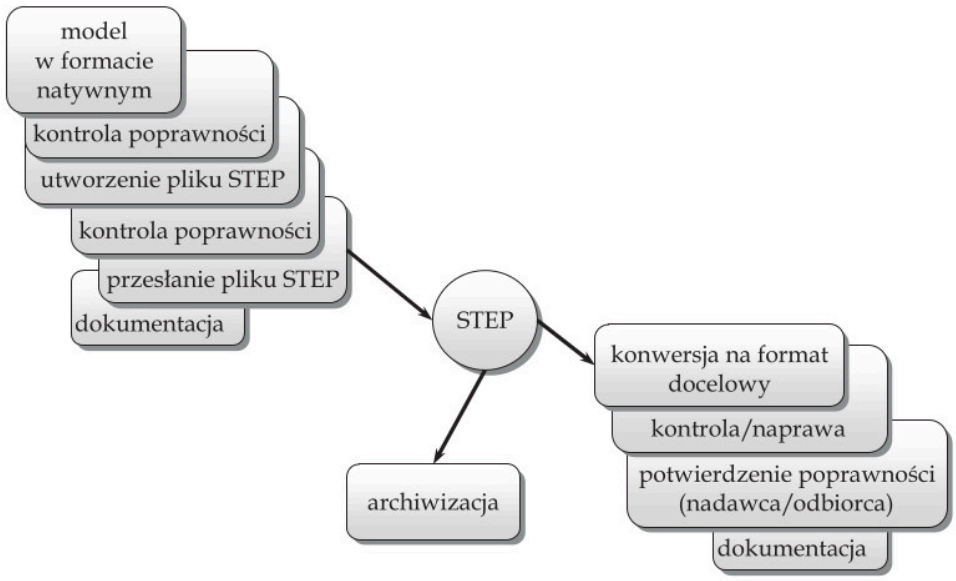
Na rysunku 64 przedstawiono dwa podejścia do problemu wymiany danych pomiędzy sześcioma systemami CAD, na rysunku 64a zastosowano wbudowane lub zewnętrzne konwertery do zmiany z jednego natywnego formatu na drugi (każda z piętnastu łączących linii na rysunku reprezentuje dwa konwertery jednokierunkowe). Natomiast na rysunku 64b przedstawiono konwersję

z zastosowaniem formatu STEP. Zastosowanie neutralnego uniwersalnego formatu danych dodatkowo umożliwiło archiwizację danych.



Rysunek 64. Wymiana danych pomiędzy sześcioma systemami CAD: a) za pomocą 30 translatorów, b) za pomocą 12 translatorów i formatu STEP

Zalecana procedura konwersji i przesłania pliku z jednego formatu natywnego do drugiego przez STEP połączona z archiwizacją danych została przedstawiona na rysunku 65.



Rysunek 65. Procedura konwersji z wykorzystaniem STEP

Zalecaną dokładność (tolerancję geometryczną), którą należy ustawić w opcjach konwersji podczas eksportu z wybranych programów, przedstawia tabela 30.

Tabela 30. Zalecana dokładność geometryczna ustalana w trakcie konwersji do formatu STEP

Program	**Dokładność**
Acis (kernel)	0,0000254 mm (0,000001 cali)
Cadds	0,001 mm
CATIACATIACATIA	0,1 mm
I-DEAS	0,01 mm
Pro-E	0,03048 mm (0,0012 cali)
Unigraphics	0,00001 mm

6.5. Komercyjne formaty wymiany danych

Producenci oprogramowania CAD zajęli się również problematyką wymiany danych. Ważniejsze tego typu formaty zawiera tabela 31.

Tabela 31. Komercyjne formaty wymiany danych CAD

Format	Producent	Opis
DXF	Autodesk	Dla formatu *drawing interchange format* - format ASCII lub binarny służący do eksportu lub importu rysunków między aplikacjami. Dostępna bezpłatnie pełna specyfikacja formatu DXF
JT	Siemens PLM Software	Plik o dużym stopniu kompresji, jego rozmiar może wynosić zaledwie 10% rozmiaru pliku CAD. z którego został wygenerowany. Powstała inicjatywa JT Open, dzięki której inni dostawcy systemów CAD uwzględniają ten format w swoich produktach
STL	3D Systems	STL (Stereolithographics) - pochodzi od szybkiego prototypowania, format stratny - można w nim zapisać jedynie powierzchnie obiektów trójwymiarowych bez takich atrybutów, jak kolor, tekstura itp. Powierzchnia jest opisywana za pomocą trójkątów w kartezjańskim układzie współrzędnych

Popularnym formatem stosowanym do wymiany danych CAD jest DXF (Drawing Interchange File; nazywany często niewłaściwie Data Exchange Format) firmy Autodesk opublikowany w 1994 roku

(najnowsza, dziesiąta wersja tego formatu pochodzi ze stycznia 2008 roku i jest oznaczona v.u.23.1.01)[65]. DXF został zaprojektowany do wymiany danych między programami AutoCAD i 3D Studio, jego korzystne cechy sprawiły jednak, że zakres jego zastosowania się powiększył i powszechnie używa się go do transferu danych CAD. Podstawowymi zaletami formatu są względnie prosta struktura oraz to, że Autodesk udostępnia jego pełną specyfikację. Nie jest to format idealny, wprawdzie można w nim zapisywać zarówno obiekty 2D, jak i 3D, jednak nie umożliwia zapisu istotnych obiektów, np. brył CSG[66] oraz niektórych obiektów 2D. Tylko częściowo można zapisać w pliku DXF bloki dynamiczne[67], które pojawiły się od wersji 2006 AutoCAD. DXF jest plikiem tekstowym w formacie ASCII, dzięki czemu jego poprawny odczyt i zapis są możliwe na każdej platformie sprzętowej i systemowej. Wadą takiego rozwiązania jest jednak stosunkowo duża wielkość pliku w porównaniu z jego binarnym odpowiednikiem DWG, jak również znacznie dłuższy czas odczytu i zapisu pliku. W przypadku rysunku zawierającego tylko jeden odcinek linii prostej plik DXF osiąga długość około 1300 linii.

Struktura pliku DXF jest dosyć prosta. Dzieli się na sekcje, w skład których wchodzą grupy. Poszczególne sekcje oddzielone są od siebie separatorami. Struktura pliku została przedstawiona w tabeli 32.

Tabela 32. Struktura pliku DXF

Sekcja	**Opis**
HEADER	Ogólna informacja na temat rysunku (np. nazwa programu, który zapisał ten plik)
TABLES	Sekcja zawierająca opis specjalnych elementów rysunku, które mają swoje nazwy i są zorganizowane w tablice: Linetype (LTYPE) table - definicje typów linii Layer table - definicje warstw rysunkowych

	Text style (STYLE) table - definicje krojów pisma View table - definicje zapisanych ustawień widoków 3D User Coordinate System (UCS) table - lokalne układy współrzędnych Viewport configuration (VPORT) table - ustawienia okna rysunku (rzutni) Drawing manager (DWGMGR) table - obszar zarezerwowany do wykorzystania w przyszłości
BLOCKS	Definicje bloków rysunku, czyli elementów pogrupowanych złożonych z wielu elementów podstawowych
ENTITIES	Najważniejsza sekcja pliku - sekcja elementów graficznych, która opisuje kształt i właściwości wszystkich prymitywów, z których składa się model CAD
OBJECTS	Dane o osadzonych obiektach niegraficznych używanych w wewnętrznych językach programowania stosowanych w programie AutoCAD (np. AutoLISP i ObjectARX)
THUMBNAILIMAGE	Zawiera podgląd zawartości pliku DXF
END OF FILE	Znacznik końca pliku

Przedstawiona w tabeli struktura jest charakterystyczna dla rysunków utworzonych przez programy firmy Autodesk. W plikach zapisanych przez aplikacje innych producentów mogą nie występować niektóre sekcje.

Jeden z ważniejszych formatów plików stosowanych w CAD to format DWG firmy Autodesk (rozszerzenie pliku: *.dwg), jego nazwa pochodzi od słowa „drawing”. Nie jest to format wymiany danych, lecz format natywny takich programów, jak AutoCAD, Inventor oraz Mechanical Desktop. Firma Autodesk przez wiele lat była monopolistą na rynku CAD, szacuje się, że na świecie

są miliardy plików DWG. Większość programów CAD ma wbudowane konwertery DWG.

Format DWG rozwijano od 1982 roku, wydano kilkanaście jego wersji; ostatnie trzy wersje to: (1) *AC1021* (2007 – 2008), (2) *AC1018* (2004 – 2006), (3) *AC1015* (2002 – 2000). W programie bazującym na starszej wersji formatu nie można odczytać jego nowszej wersji. Istnieje wiele programów CAD (poza programami firmy Autodesk) odczytujących format DWG (m.in. progeCAD, IntelliCAD, ArchiCAD, Bricscad, DataCAD, IntelliCAD, MicroStation, SolidWorks, Tekla Structures, VectorWorks, ViaCAD – Punch! Software, PowerCAD, ZwCAD, Corel Designer.

W 1998 roku powstało The Open Design Alliance – stowarzyszenie twórców i użytkowników oprogramowania typu CAD, którego misją jest zapewnienie jak największej dostępności do plików CAD, szczególnie do popularnego formatu DWG[68]. Stowarzyszenie oferuje obecnie dwa otwarte formaty: DWGdirect (oparty na pliku DWG)[69] oraz DGNdirect (oparty na pliku DGN firmy Bentley Systems, producenta oprogramowania Microstation). Celem ODA jest dostarczenie bibliotek umożliwiających zapis i odczyt plików. Biblioteki te są rokrocznie uaktualniane wraz z pojawieniem się nowych wersji formatów DWG i idn.

W tabeli 33 zestawiono popularne formaty do publikacji danych.

Tabela 33. Formaty do publikacji danych

Rozszerzenie	**Nazwa**	**Producent**	**Uwagi**
*.dwf	**D**esign **W**eb **F**ormat	Autodesk	Wektorowy 3D. Skompresowany plik do publikacji na stronach WWW. Ma możliwość zabezpieczenia dostępu. Zawiera mniej informacji niż typowe pliki CAD,

			przeznaczony do konsultowania, przeglądania lub drukowania projektów. Do otwierania plików DWF służą darmowe przeglądarki Autodesk. Wszystkie programy tej firmy są w stanie generować pliki DWF
*.pdf	**P**ortable **D**ocument **F**ormat	Adobe Systems	Wektorowy. Do prezentacji, publikacji i drukowania treści tekstowo-graficznych. Format PDF jest okrojoną wersją formatu EPS (*.eps) (PostScript) wzbogaconą o elementy hipertekstowe. Dostępna jest bezpłatnie pełna specyfikacja PDF
*.wmf	**W**indows **M**etafile **F**ormat	Microsoft	Wektorowy. Format stosowany w systemach Windows zawierający instrukcje dla systemu operacyjnego, jak

			wyświetlać grafikę wektorową i rastrową
.bmp (.dib)	**B**it**M**a**P** (device-independent bitmap)	Microsoft	Rastrowy. Mimo dużych rozmiarów popularny jako format przechowywania danych rastrowych. Jest formatem nieskompresowanym (czyli bezstratnym)
*.jpg	Interchange File Format	Joint Photographics Expert Group	Rastrowy stratny. Jeden z najpopularniejszych formatów grafiki rastrowej skompresowany z bardzo wydajną kompresją DCT
*.gif	**G**raphics **I**nterchange **F**ormat	CompuServe	Rastrowy, paleta barw ograniczona do 256 pozycji (tzw. barwa indeksowana), kompresja bezstratna LZW (Lempel-Ziv-Welch) jak w plikach ZIP
*.tif	Portable Network Graphics	PNG Development Group	Rastrowy bezstratny format kompresji, unowocześniona wersja gif (można zapisać pełną paletę barw)

.tif (.tiff)	**T**agged **I**mage **F**ile **F**ormat	Grupa firm, m.in. Aldus Corporation	Standardowy format rastrowy stosowany w poligrafii, ma wiele odmian różniących się paletą kolorów (1, 2, 4, 8, 16, 24 bity na piksel) oraz rodzajem kompresji, umożliwia stosowanie kompresji bezstratnej (m.in. LZW, CCITT). Umożliwia zapisywanie dokumentów wieloarkuszowych, zawierających wiele obrazów

Jednym z ważniejszych formatów zebranych w tabeli 34 jest DWF firmy Autodesk. Dokumenty DWF można otwierać za pomocą bezpłatnej przeglądarki Autodesk o nazwie DWF Viewer. Format służy do zapisu trójwymiarowych dokumentów przeznaczonych do kontaktów z klientami.

Do przeglądania, komentowania oraz publikacji danych CAD służą przeglądarki plików, część z nich jest darmowa.

Tabela 34. Przeglądarki plików z grafiką inżynierską

Program	**Import**	**Eksport**
DWF Viewer	DWF	DWF
PCschematic ELautomation	DWG/DXF	DWG/DXF
iOMO	DXF	DXF

MicroFe	DXF	DXF
GEMS	DXF, DWG	DXF, DWG
MSC.visualNastran 4D	Solid Edge, IGES, ACIS, Parasolid, STEP(AP208), STL	DAT, SAT
TwinView	DXF, DWG	DXF, DWG, DGN, DWF, HPGL, TXT, TIFF, JPG, BMP, GIF, PNG, WMF, EMF, ICO
ArCon+	DXF, DWG, HPGL	VRML, DXF, HPGL
DTP Express (konwerter)	DXF, DWG	PDF, EPS, WMF, EMF, HPGL, SVG, DWF (wersja PRO) oraz TIFF, PNG, JPG, BMP

W przypadku gdy istnieje konieczność zapoznania się jedynie z ogólnymi założeniami projektowanego produktu, zastosowanie znajdują nieskomplikowane przeglądarki z uproszczonym widokiem umożliwiające obracanie i oglądanie modelu w trzech wymiarach. Natomiast jeśli zachodzi konieczność przekazania dużej liczby danych projektowych, np. szczegółowych wymiarów, należy posłużyć się bardziej zaawansowanym narzędziem. Większość współczesnych przeglądarek i stosowanych w nich formatów umożliwia obracanie modelu, powiększanie obrazu, a nawet wykonywanie i prezentowanie przekroju elementów. Zaawansowane przeglądarki oferują również dostęp do danych technologicznych PMI (vide „Słownik ważniejszych terminów CAx"). Wybierając format do publikacji danych, warto również sprawdzić, jak pliki wybranego formatu będą widziane przez oprogramowanie biurowe oraz czy oferują możliwość zabezpieczenia danych. Dobrze jest pliki zapisane w formacie do przeglądania całkowicie zsynchronizować z głównym projektem CAD. Takie możliwości z reguły oferują zaawansowane systemy zarządzania danymi produktu (systemy typu PDM). Istotne są również cel stosowania formatu do prezentacji danych (np. czy

będzie go jednocześnie wykorzystywać wielu specjalistów, czy raczej przeznaczony jest do celów marketingowych), stopień kompresji danych i związana z tym wielkość pliku, a także typowe dla określonej branży preferencje. W praktyce przemysłowej kładzie się nacisk na stosowanie jednego formatu zapisu danych prezentacyjnych w obrębie przedsiębiorstwa.

6.6. Integracja CAD z CAM

Celem operacyjnym projektowania jest uzyskanie informacji niezbędnej do wytworzenia projektowanego obiektu, dlatego tak ważną rolę odgrywa problematyka integracji komputerowo wspomaganego projektowania (CAD) z komputerowo wspomaganym wytwarzaniem CAM (Computer Aided Manufacturing). CAM to systemy oprogramowania inżynierskiego wspomagające:

- tworzenie programów sterujących NC (Numerical Control),
- uruchamianie programów NC (symulacja, weryfikacja) sterowanie i nadzorowanie urządzeń i procesów wytwarzania oraz montażu na najniższym poziomie systemów wytwórczych (poziom wydziału produkcyjnego).

Funkcje systemów CAM mogą się odnosić do urządzeń CNC (Computerized Numerical Control):

- obrabiarek (pilarek, frezarek, tokarek, centrów obróbczych itp.),
- współrzędnościowych maszyn pomiarowych,
- robotów przemysłowych,
- systemów transportowych,
- innych urządzeń z programowym sterowaniem przemieszczeń.

NC – czyli sterowanie numeryczne, to rodzaj sterowania programowego maszyn technologicznych (zwłaszcza obrabiarek). Program NC (program sterujący) zawiera informacje o:

- kształcie drogi narzędzi,
- parametrach technologicznych procesu (prędkości, posuwy),
- wymianie narzędzi,
- czynnościach pomocniczych.

Podstawowym zadaniem takiego programu jest sterowanie przemieszczeniami względnymi w obrabiarce sterowanej numerycznie (CNC) między narzędziem i przedmiotem obrabianym w przestrzeni opisanej za pomocą układu współrzędnych oraz sterowanie realizacją funkcji przełączających. CNC to obrabiarki wyposażone w układy sterowania numerycznego, w których sygnały sterujące dla napędów ruchów głównych, posuwowych i pomocniczych opracowane są przez komputer wyposażony w oprogramowanie systemowe.

Można wyróżnić trzy rodzaje programowania obrabiarek CNC:

- ręczne,
- maszynowe,
- CAD/CAM.

Programowanie ręczne polega na przygotowaniu programów obróbki bezpośrednio na obrabiarce przez operatora obrabiarki. W **programowaniu maszynowym** następuje zapis programu za pomocą specjalizowanego języka symbolicznego i dalsze przetwarzanie danych symbolicznych do postaci programu sterującego NC przez zewnętrzny komputer. **Programowanie CAD/CAM** polega na wykorzystaniu systemu (platformy programowej) CAD/CAM do wygenerowania kodu NC wprost z cyfrowego modelu obiektu.

Wymienione dwa pierwsze rodzaje programowania nadają się do przygotowywania technologii prostych części (programowanie maszynowe ma w zasadzie już tylko znaczenie historyczne), np. przygotowania rozkroju płyt za pomocą formatyzerki. Ostatni rodzaj programowania – CAD/CAM, ma największe możliwości, w zasadzie jego jedyną wadą jest wysoka cena dedykowanego do tego celu oprogramowania. Programowanie CAD/CAM może być realizowane

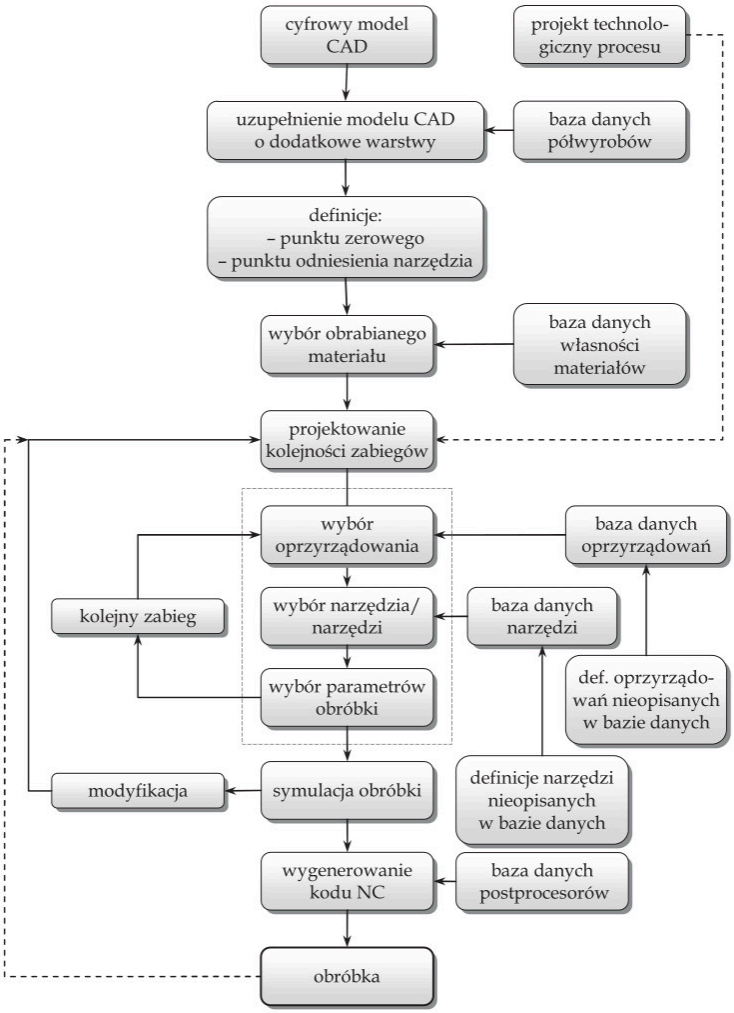
przez system CAD/CAM lub przez system CAM na podstawie modelu CAD.

Wynikiem projektowania CAD/CAM procesów technologicznej obróbki części są trajektorie narzędzi rozbite na poszczególne operacje, zabiegi i przejścia elementarne wygenerowane przez postprocesor w postaci kodu zrozumiałego dla systemu CNC danej obrabiarki. Takie podejście umożliwia:

- automatyczne generowanie trajektorii narzędzia dla operacji frezarskich, tokarskich, wiertarskich, frezarsko-tokarskich itp.;
- generowanie neutralnego pliku roboczego CL (ang. ***C****utter* ***L****ocation data file)*;
- korzystanie z gotowej biblioteki typowych narzędzi i typowego oprzyrządowania technologicznego (ang. *tooling library*), z możliwością utworzenia własnej biblioteki zawierającej narzędzia i oprzyrządowanie specjalne utworzone np. na bazie gotowych modeli zaczerpniętych z *tooling library*;
- sterowanie parametrami procesu technologicznego;
- monitoring procesu technologicznego wraz z symulacją przebiegu narzędzia oraz wykrywaniem kolizji narzędzi;
- tworzenie dokumentacji w postaci kart technologicznych zawierających wszystkie informacje dotyczące procesu oraz użytego oprzyrządowania;
- wykrywanie nieprawidłowości doboru elementów układu OUPN (obrabiarka – uchwyt – przedmiot – narzędzie).

Przebieg programowania obrabiarki CNC z wykorzystaniem oprogramowania CAD/CAM przedstawia rysunek 66. Programowanie rozpoczyna się od uzupełnienia modelu cyfrowego o naddatki na obróbkę. Kształt modelu wyrobu jest osadzany w kształcie półwyrobu. W dalszej kolejności następuje określenie współrzędnych ważniejszych punktów – punktu zerowego przedmiotu obrabianego[70] względem punku zerowego obrabiarki[71] oraz punktu odniesienia narzędzia[72]. Kolejny krok stanowi wybór obrabianego materiału (od właściwości technologicznych materiału zależą parametry obróbki). Następnie planuje się liczbę i kolejność

zabiegów. Do każdego zabiegu dobierane są narzędzia oraz parametry obróbki. Jednym z najważniejszych etapów przygotowywania obróbki jest jej symulacja. Symulacja obróbki umożliwia obejrzenie działania programu obróbczego na monitorze komputera. Symulator obróbki wiernie odtwarza pracę rzeczywistej obrabiarki w sposób ciągły lub krok po kroku. Ten etap umożliwia wykrycie ewentualnych kolizji narzędzia z materiałem oraz analizowanie i optymalizację parametrów obróbki, takich jak: ścieżki narzędzi, prędkość obrotowa narzędzia lub przedmiotu, prędkość skrawania, wartość posuwu roboczego, przemieszczenie narzędzia lub współrzędne punktu docelowego. Po wykonaniu symulacji obróbki i wprowadzeniu niezbędnych zmian następuje wygenerowanie kodu dla określonej obrabiarki CNC. Kod generuje się, korzystając z bazy danych postprocesorów. Wymagana składnia kodu zależy od producenta obrabiarki. Dane o parametrach realizowanej obróbki mogą posłużyć jako podstawa do wprowadzenia zmian w realizowanych zabiegach.



Rysunek 66. Typowy przebieg procesu projektowania programów NC w systemach CAD/CAM

Istotnym parametrem oprogramowania CAM jest możliwość współpracy z dużą liczbą programów CAD. W tabeli 35 przedstawiono możliwości eksportu i importu danych przez wybrane programy CAD/CAM oraz CAM.

Tabela 35. Możliwości eksportu i importu danych dla wybranych programów CAD/CAM

Program	**Import**	**Eksport**

SolidWorks & SolidCAM	DXF, DWG, IGES, STEP, Parasolid, ACIS, stl, VDAFS, Pro-E, UGII, Inventor, Solid Edge, Cadkey, IDF, CATIA Graphics	Parasolid. IGES, STEP, ACIS, VDAFS, STL. CATIA Graphics, Pro-E, Realitywave. JPG, HCG, HOOPS, HSF. PDF. TIF. DXF, DWG
SPRUTCAM	IGES, STL, 3DM, VRMT, Parasodid, DXF, postscript	-
EdgeCAM	AutoCAD, CATIA v4/v5, Inventor, MicrosStation, Pro/Engineer, Solid Edge, SolidWorks, Acis, Granite, Parasolid, IGES, VDA, STL	AutoCAD. IGES, STL, Parasolid
AlphaCAM (AC) oraz SufrCAM (SC)	DXF, DWG, IGES, VDA-FS, 3D XYZ, STEP, Parasolid, SolidWorks, Solid Edge, NX (Unigraphics), CATIA v4/v5, ACIS. Inventor, Pro/Engineer, stl, RHINO, ACIS, VDAFS, STEP, UGII	DXF. IGES. VDA-FS, WMF, DWG. SAT. Parasolid. STL
DELCAM	IGES, STEP, VDAFS, Parasolid, ACIS, stl, AutoCAD, CATIA, Pro/Engineer, (NX) Unigraphics, Ideas. Solid Edge, SolidWorks, Cimatron, Rhino, Inventor	IGES. STEP. VDAFS, Parasolid. ACIS, STL. AutoCAD. CATIA, Pro/E
HyperMill	DXF, DWG, IGES, STEP. VDA, STL, XGL, VRML, CATIA v4/v5, Parasolid, Pro/Engineer, (NX) Unigraphics	DXF. DWG. IGES, STEP, VDA. STL, XGL. VRML
NCSIMUL	NC: FIDIA, FANUC, HEIDENHEIN, SIEMENS,	STL (ascii. bin). VRML, XML. CATIA,

	MAHO, NUM. ACRAMATIC, MAZAK. DECKEL, PHILIPS, APT, BOSH, OKUMA, MILLPLUS, DIXI, ELSA	Pro/E. GOElan. CADDS, EUCLID, IGES
Mold Adviser	IGS, IGES, STP, STEP, X_T,X_B, ADN. STL, SLD, CTM	ADV, MB , BF3. UDM.STL. AZX
PART ADVISER	IGS, IGES, STP, STEP, X_T, X_B, ADN, STL, SLD, CTM, ADV	ADV, MB , BF3. UDM.STL. AZX
Fastform Advanced	IGS, IGES, STP, STEP, LIN, NAS, VDA	IGS, IGES, DXF. NAS, MOD

6.7. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 6.

1. Wymień trzy metody wymiany danych między programami CAD.
2. Wskaż zalecaną kolejność stosowania trzech podstawowych metod wymiany danych.
3. Wymień i scharakteryzuj wybrane uniwersalne formaty wymiany danych.
4. Wymień i scharakteryzuj wybrane komercyjne formaty wymiany danych.
5. Wymień i scharakteryzuj wybrane formaty do publikacji danych.
6. Rozwiń skrót CAM.
7. Wymień i scharakteryzuj wybrane sposoby integracji CAD z CAM.
8. Rozwiń skrót CNC.
9. Czym charakteryzuje się oprogramowanie CAD/CAM?
10. Wymień kilka przykładów programów CAD/CAM.

7. Obliczenia wytrzymałościowe wspomagane komputerem

7.1. O obliczeniach wytrzymałościowych

Obliczenia wytrzymałościowe mają na celu zapewnienie bezpiecznej i niezawodnej pracy projektowanych urządzeń technicznych, zwiększenie ich osiągów oraz zmniejszenie zużycia materiałów stosowanych do konstruowania. Obliczenia inżynierskie można podzielić na dwie grupy: (1) obliczenia realizowane w jednym przejściu – opierające się na dużym zbiorze danych (dotyczą zwykle poszukiwanych wielkości, takich jak mapa naprężeń, mapa odkształceń, przewodnictwo ciepła, bilanse energetyczne, obliczenia pól powierzchni, masy itp.); (2) obliczenia iteracyjne – powtarzające się, wykonywane podczas symulacji, optymalizacji. W praktyce inżynierskiej w trakcie przeprowadzania obliczeń wytrzymałościowych stosuje się pięć głównych kryteriów:

- kryterium naprężeń dopuszczalnych,
- kryterium dopuszczalnego odkształcenia,
- kryterium stateczności,
- kryterium pełzania materiału,
- kryterium zmęczenia materiału.

Niezależnie od rodzaju projektowanego obiektu wszystkie z wymienionych kryteriów muszą być spełnione. Jeżeli w konkretnym przypadku projektant poprzestaje na sprawdzeniu tylko jednego z nich, oznacza to, że uważa, iż pozostałe są z całą

pewnością spełnione (za co bierze pełną odpowiedzialność) [Niezgodziński i Niezgodziński 1996].

Wirtualny prototyp CAD można potraktować jako zbiór modeli kryterialnych tego samego środka technicznego. Modele kryterialne tworzone są dla wcześniej przyjętych i zdefiniowanych stanów kryterialnych. Stanami kryterialnymi, z punktu widzenia wytrzymałości, mogą być wybrane krytyczne zestawy obciążeń i podparć (warunków brzegowych). Identyfikacja stanów kryterialnych jest najtrudniejszym i najbardziej odpowiedzialnym zadaniem inżynierskim. Może się odbywać na podstawie danych uzyskanych z eksploatacji, na stanowisku badawczym prototypu lub na podstawie analizy podobnych konstrukcji.

7.2. Zastosowanie metody elementów skończonych

Jedną z częściej stosowanych metod obliczeń wytrzymałościowych jest metoda elementów skończonych (MES)[73] (ang. FEM, *Finite Element Method*), w wyniku której po przeprowadzeniu obliczeń na modelu cyfrowym uzyskuje się przestrzenną mapę rozkładu poszukiwanej wartości (np. mapę naprężeń lub przemieszczeń). Z matematycznego punktu widzenia MES jest sposobem uzyskiwania przybliżonego rozwiązania równań różniczkowych cząstkowych[74]. Jej teoretyczne podstawy zostały sformułowane pod koniec lat pięćdziesiątych XX wieku (jako metody prowadzenia obliczeń z zakresu mechaniki strukturalnej), choć sama idea powstała już w XIX wieku. W jednej z prac Kirscha (1868)[75] zasugerowano zastąpienie trójwymiarowego ustroju ciągłego zbiorem oddzielnych elementów prostopadłościennych, a następnie zastąpienie każdego z nich przestrzenną kratownicą. Każdą z tych kratownic należało następnie rozwiązać znanymi metodami statyki.

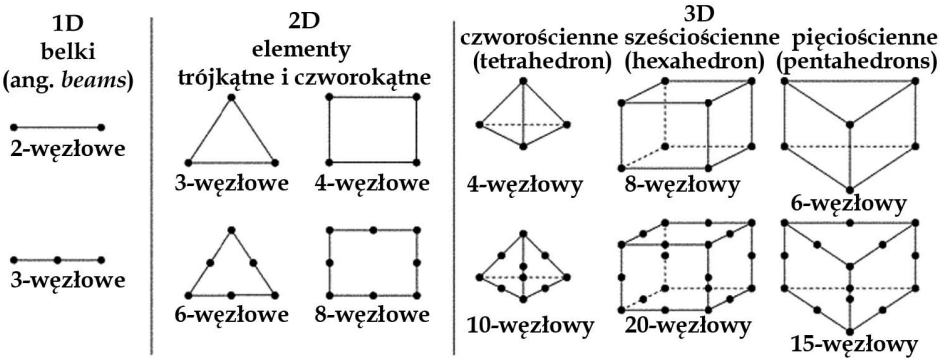
W latach pięćdziesiątych XX wieku teoretyczne podstawy rozwiązania wybranych problemów mechaniki za pomocą komputera sformułowali Turner, Clough, Martin i Topp[76]. Z praktycznego punktu widzenia kluczowe były jednak prace prof. Zienkiewicza[77] [Felippa 2000] oraz prof. Przemienieckiego z lat sześćdziesiątych XX wieku, w których przedstawiono metody praktycznego zastosowania MES wraz ze sposobami uniknięcia wybranych trudności natury matematycznej. Do dziś w światowej literaturze poświęconej CAE prof. Zienkiewicza uważa się za prekursora praktycznego zastosowania metody elementów skończonych do rozwiązania problemów mechaniki.

Klasyczna wytrzymałość materiałów opiera się na ciągłym jednorodnym modelu ciała sprężystego, na podstawie którego wyznacza się naprężenia i przemieszczenia za pomocą metod analizy matematycznej (rachunek różniczkowy i całkowy). Uzyskanie ścisłego rozwiązania jest możliwe tylko w przypadku stosunkowo prostych modeli geometrycznych. Aby otrzymać rozwiązania dla bardziej złożonych modeli, trzeba stosować różne uproszczenia, pomijać pewne czynniki, stosować przybliżone metody rozwiązywania równań. Po dokonaniu uproszczeń otrzymuje się rozwiązania jedynie dla określonej liczby punktów.

Podstawową zaletą MES jest możliwość uzyskania wyników dla obiektów o skomplikowanych kształtach, dla których niemożliwe jest przeprowadzenie obliczeń analitycznych. Oznacza to, że dane zagadnienie może być symulowane w pamięci komputera bez konieczności budowania prototypu, co znacznie ułatwia proces projektowania (skraca czas projektowania i zmniejsza koszty przygotowania produkcji nowego wyrobu).

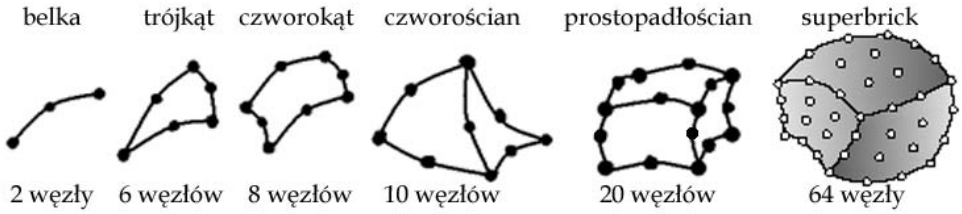
Istotę metody elementów skończonych stanowi dyskretyzacja obiektu ciągłego, jakim jest obiekt rzeczywisty. Dyskretyzacja polega na podziale rozważanego obszaru na podobszary (tzw. elementy skończone). Współczesne konstrukcje inżynierskie dzieli się na dziesiątki tysięcy elementów. W konstrukcjach dużych, złożonych można wydzielić pewne powtarzalne grupy elementów, które definiuje się jako tzw. superelementy złożone z kolei z pewnej liczby elementów. Efektem dyskretyzacji jest transformacja continuum

o nieskończonej liczbie stopni swobody (zdolności do zmiany wartości określonej współrzędnej) do postaci układu o skończonej liczbie stopni swobody. Wewnątrz uzyskanych za pomocą dyskretyzacji elementów określa się funkcje bazowe φ_i zapewniające ciągłość poszukiwanej funkcji na granicy elementów (będącej rozwiązaniem zadania). Stosowane funkcje bazowe są najczęściej wielomianami, natomiast elementy prostymi bryłami (czworościany, sześciany) przy dyskretyzacji przestrzeni lub prostymi figurami (trójkąty, czworokąty) przy dyskretyzacji powierzchni. Wówczas obliczenia MES są nieskomplikowane i efektywne. Każda aplikacja CAE ma swój zestaw elementów skończonych, przykłady najczęściej stosowanych elementów przedstawiono na rysunkach 67 i 68. Każdy element skończony ma wstępnie określone dopuszczalne odstępstwa od prawidłowego kształtu. Po utworzeniu siatki elementy są zwykle nieznacznie zdeformowane – wyciągnięte lub skręcone o pewien kąt. Wyniki obliczeń są zależne zarówno od kształtu, jak i liczby elementów w modelu. Zbyt gruba siatka, zbyt zniekształcona lub nawet drobna, lecz zniekształcona powodują uzyskanie mało dokładnych albo złych wyników. Dyskretyzacja jest zatem kompromisem. Stosując gęstą siatkę, zmniejsza się deformację elementów, ale wydłuża czas obliczeń. Stosując zbyt grubą siatkę, uzyskuje się w efekcie silnie zdeformowane elementy i zmniejszoną dokładność.



Rysunek 67. Wybrane elementy skończone pierwszego rzędu

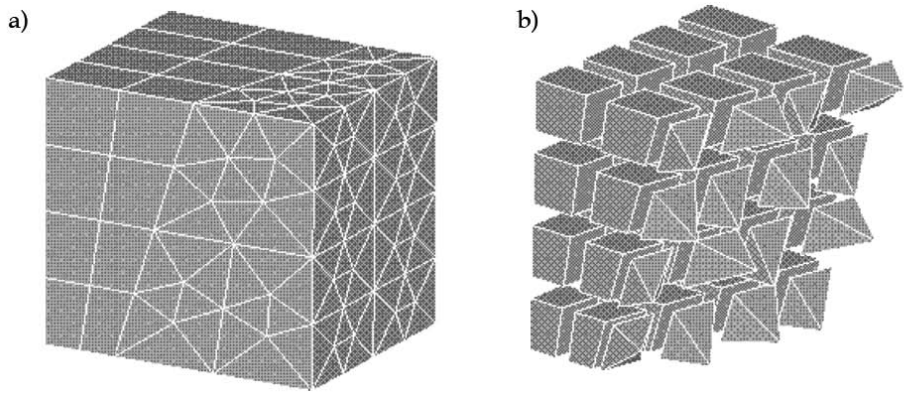
Elementy skończone pierwszego rzędu pokazane na rysunku 67 nazywane bywają elementami liniowymi (ich funkcja kształtu jest funkcją liniową), natomiast elementy drugiego rzędu pokazane na rysunku 68 – elementami nieliniowymi (funkcja kształtu jest nieliniowa).



Rysunek 68. Przykłady elementów drugiego rzędu

W praktyce elementy pierwszego rzędu dają mniej dokładne wyniki, lecz wymagają mniejszej mocy obliczeniowej komputera w porównaniu z elementami drugiego rzędu. Na uwagę zasługuje przedstawiony na rysunku 68 64-węzłowy superbrick, najprawdopodobniej najbardziej złożony ze wszystkich stosowanych w MES [Felippa 2004].

Oprócz przedstawionych istnieje jeszcze wiele elementów skończonych specjalnego zastosowania, np. elementy typu sprężyna, typu tłumik, typu masa skupiona, elementy kontaktowe (GAP) itp.



Rysunek 69. Przykład dyskretyzacji obiektu ciągłego: a) widok, b) widok rozstrzelony

Typowy program CAE przeznaczony do obliczeń inżynierskich MES składa się z trzech wzajemnie współpracujących modułów:

- preprocesor (do importu lub przygotowania geometrii, doboru rodzaju elementów skończonych, dyskretyzacji i ustalenia warunków brzegowych),
- solver (do budowy oraz rozwiązania układu równań, na podstawie którego uzyskuje się poszukiwane wartości danych wielkości fizycznych),
- postprocesor (do prezentacji oraz wspomagania interpretacji uzyskanych wyników).

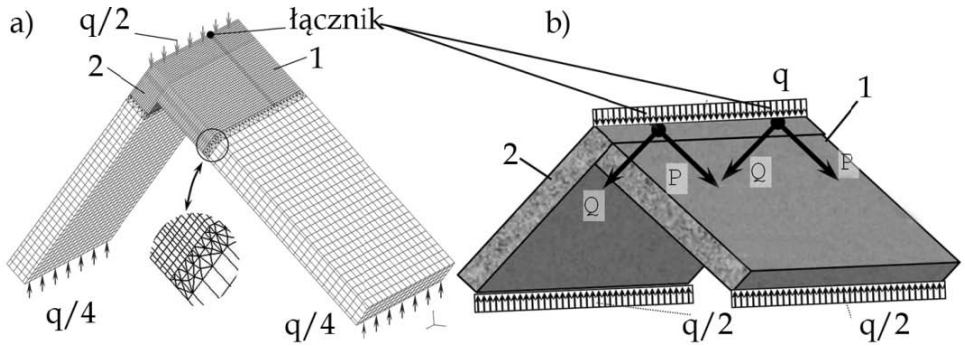
Ogólna procedura przeprowadzania obliczeń przebiega w następujących krokach (kroki 1 – 4 – preprocesor; 5 – 6 – solver; 7 – postprocesor):

1. Utworzenie modelu geometrycznego (może być utworzony w oprogramowaniu CAD i zaimportowany lub utworzony bezpośrednio w programie do obliczeń MES). Z modelu usuwa się elementy nieistotne (promienie, fazy itp.). Jeśli obliczany model ma symetrię kształtu, obciążeń i warunków podparcia, wówczas można przeprowadzić obliczenia dla połowy obiektu w celu szybszego uzyskania wyników, tak jak przedstawiono na rysunku 70.
2. Dyskretyzacja modelu przez podział na elementy (wygenerowanie siatki, ang. *mesh*) – ten krok jest najczęściej realizowany przez program w sposób automatyczny. Użytkownik może dobrać rodzaj elementu (lub rodzaje) oraz lokalnie zmodyfikować siatkę (np. zagęścić w miejscach przewidywanej koncentracji naprężeń).
3. Przyjęcie wartości właściwości materiałowych (np. moduł Younga, wytrzymałość na ściskanie itp.).
4. Przyłożenie obciążeń (w postaci sił skupionych, momentów skręcających, obciążeń ciągłych itp.) oraz określenie warunków brzegowych przez odebranie stopni swobody punktom, krawędziom lub powierzchniom.
5. Wybranie rodzaju analizy.

6. Rozwiązanie modelu (w ciągu iteracji).
7. Opracowanie uzyskanych map naprężeń, przemieszczeń itp.

Po wykonaniu obliczeń można wprowadzić zmiany w geometrii projektowanego wyrobu lub zmianę materiału i powtórzyć obliczenia.

Poniżej przedstawiono przykład zastosowania metody elementów skończonych do obliczenia wartości i rozkładu naprężeń w płytach półsztywnego połączenia kątowego.

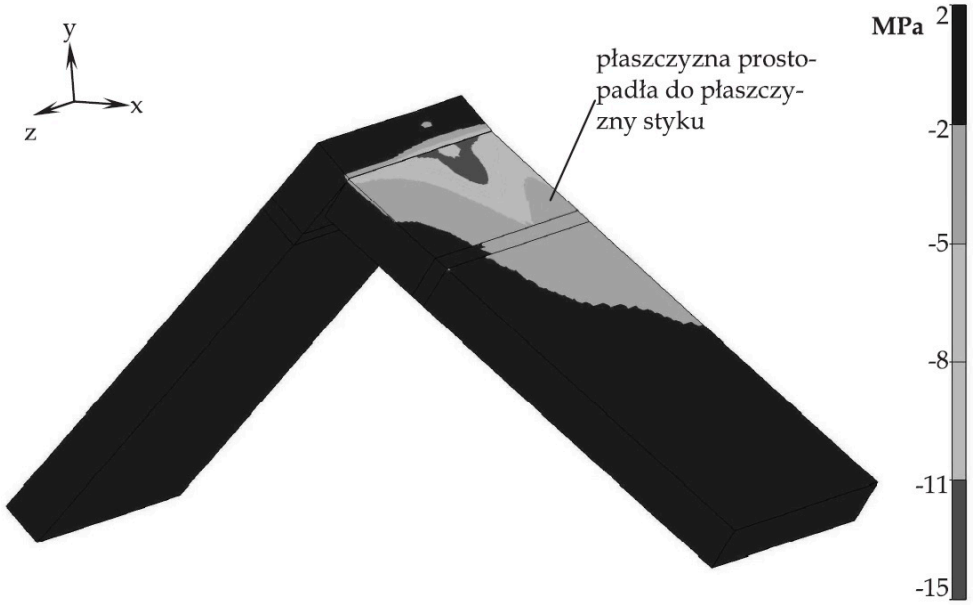


Rysunek 70. Przykład wykorzystania symetrii geometrii i obciążenia dla modelu półsztywnego połączenia narożnikowego: a) połowa modelu z wygenerowaną siatką elementów skończonych, b) cały model z obciążeniami i warunkami brzegowymi

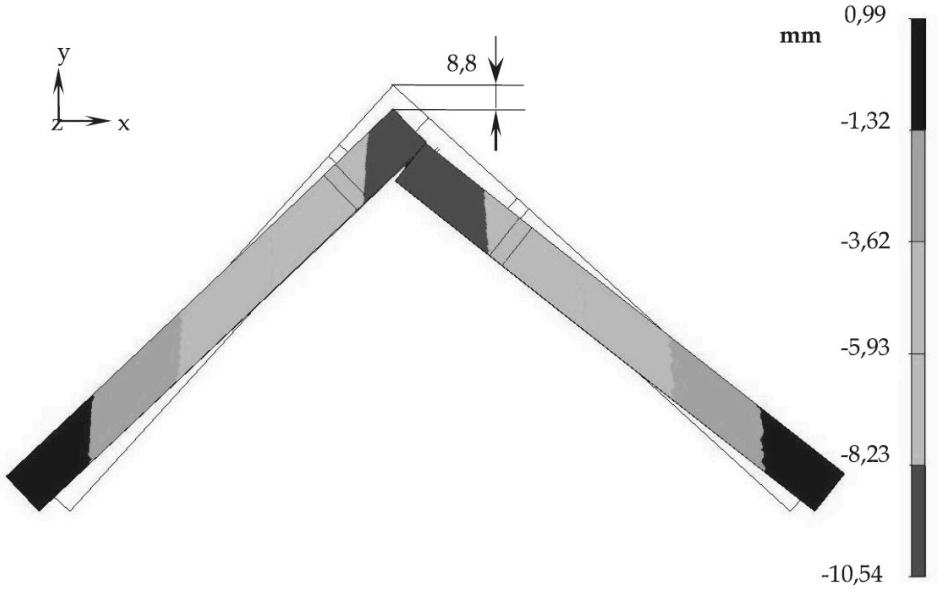
Model przedstawiony na rysunku 70a dyskretyzowano, tworząc siatkę strukturalną składającą się z dwóch rodzajów elementów liniowych: prostopadłościennych (ang. *solid linear brick*) oraz czworościennych (ang. *solid linear tetrahedron*). Każda płyta składała się z dwóch obszarów z elementami prostopadłościennymi oddzielonych obszarem z elementami czworościennymi. Siatkę zagęszczono w obszarze kontaktu płyt drewnopochodnych, obszar ten był większy dla płyty nr 1, ponieważ w tej płycie łącznik był wkręcony od strony czoła płyty. Tak zbudowany model składał się z 52 432 elementów. Wprowadzono wiele uproszczeń, największe dotyczyły geometrii łącznika oraz strefy kontaktu. Łącznik został zamodelowany jako walec (pominięto elementy zaczepowe złącza). Siłę utrzymującą złącze w płytach uzyskano dzięki przyjętej wartości

wcisku i odpowiedniemu współczynnikowi tarcia, wartość siły ustalono, opierając się na wynikach doświadczeń, w których wyznaczono wartość siły utrzymującej elementy zaczepowe złącza w płytach drewnopochodnych. Uzyskany model miał 141 292 stopnie swobody[78]. Stałe materiałowe przyjęto według danych producenta płyt, z których zbudowano połączenie.

W modelu obliczeniowym przedstawionym na rysunku 70a wprowadzono podparcie dolnych krawędzi obu płyt, umożliwiając swobodny przesuw w płaszczyźnie podparcia. Obciążenie o wartości 250 N przyłożono do górnej krawędzi płyty pionowej [Sydor 2005].



Rysunek 71. Rozkład naprężeń zredukowanych (według hipotezy Hubera-von Misesa) w kierunku prostopadłym do płaszczyzny styku płyt [Sydor 2005]



Rysunek 72. Przemieszczenie płyt połączenia pod obciążeniem [Sydor 2005]

Wybór rodzaju elementu skończonego jest ściśle zależny od rodzaju konstrukcji będącej przedmiotem analizy. Przykładowo jednowymiarowy element ma sześć stopni swobody (DOFS) w węźle, może być pierwszego i drugiego rzędu. Ma stały przekrój poprzeczny lub liniowo zmienny wzdłuż długości elementu i przenosi tylko siły osiowe i poprzeczne oraz momenty skręcający i zginające. Uproszczeniem jest nieodkształcalność przekroju poprzecznego podczas deformacji. Jakość i wiarygodność otrzymanych wyników w dużym stopniu zależą od prawidłowości doboru elementu skończonego. Podstawowe zalecenia dotyczące doboru elementów skończonych zawiera tabela 36.

Tabela 36. Zalecenia dotyczące zastosowań ważniejszych rodzajów elementów skończonych (opracowano na podstawie www.cae.info.pl, dostęp 19.05.2008)

Rodzaj problemu	**Zalecane elementy**	**Niezalecane**

Ustrój belkowy, obciążenie statyczne	Belki pierwszego rzędu (dwuwęzłowe)	Elementy 3D
Kontakt (np. docisk)	Elementy sześciościenne pierwszego rzędu	Hex. Shell - drugiego rzędu
Kontakt ze zginaniem	Modyfikowane elementy pierwszego lub drugiego rzędu	Zwykłe elementy pierwszego i drugiego rzędu.
Koncentracja naprężeń (mechanika pękania)	Elementy sześciościenne drugiego rzędu	Elementy Hex - pierwszego rzędu
Praktycznie nieściśliwe części (duża plastyczność)	Elementy sześciościenne pierwszego rzędu lub drugiego rzędu ze zredukowanym całkowaniem.	Elementy Hex - drugiego rzędu z pełnym całkowaniem
Całkowicie nieściśliwe (guma – wsp. Poissona ő = 0.5)	Elementy typu Hybrid	Wszystkie inne
Formowanie przez tłoczenie, kucie itp. (duże lokalne zniekształcenia siatki)	Elementy sześciościenne pierwszego rzędu ze zredukowanym całkowaniem	Elementy sześciościenne drugiego rzędu
Skomplikowana geometria (bez innych nieliniowości)	Czworościan drugiego rzędu	Elementy z przesuniętym punktem całkowania
Skomplikowana geometria (kontakt, nieliniowy materiał)	Modyfikowane elementy czworościenne drugiego rzędu	Elementy z przesuniętym punktem całkowania

Drgania własne (liniowa dynamika)	Elementy drugiego rzędu	Elementy pierwszego rzędu
Zderzenia, drop testy itp.	Elementy pierwszego rzędu	Elementy drugiego rzędu

Zastosowanie metody elementów skończonych we wspomaganych komputerowo analizach inżynierskich umożliwia osiągnięcie dość dokładnych wyników, których uzyskanie w sposób analityczny byłby bardzo trudne lub niemożliwe. Wykorzystanie MES do zweryfikowania poprawności funkcjonalnej danego wyrobu umożliwia optymalizację wybranych jego cech jeszcze na etapie projektu. Uzyskuje się więc możliwość radykalnego skrócenia czasu trwania uruchamiania produkcji nowego wyrobu lub modyfikacji wyrobu już znajdującego się w produkcji bez konieczności wykonywania prototypów. Jak wspomniano na początku, wyniki analiz MES opisują zachowanie się układu w sposób przybliżony, są zawsze obarczone pewnym błędem i to projektant musi zdecydować, czy jest mały i można go pominąć, czy jest nie do przyjęcia.

Przykłady komercyjnych pakietów umożliwiających obliczenia MES:

- ABAQUS (Dassault SystÞmes, Francja),
- Algor (Algor Inc., USA),
- Ansys/Ansys LSDYNA (Ansys Inc., USA),
- Nastran (MSC Inc., USA),
- CosmosWorks (Dassault SystÞmes, Francja).

Zewnętrzne moduły MES można zintegrować z oprogramowaniem CAD, dwa przykłady zawiera tabela 37.

Moduły MES mogą być wbudowane w oprogramowanie CAD.

Tabela 37. Przykłady zewnętrznych pakietów MES możliwych do zintegrowania z oprogramowaniem CAD

Pakiet MES	Współpracujące oprogramowanie CAD
ANSYS/Ansys Design Space for Solid Edge	dwukierunkowa asocjatywność z CATIA V4/V5. Pro/Engineer, Unigraphics, Autodesk Inventor/MechanicalDesktop, SolidWorks, Solid Edge
SOLID DYNAMICS	dwukierunkowa asocjatywność z CATIA. Autodesk Inventor, SolidWorks

Tabela 38. Przykłady oprogramowania CAD zawierającego wbudowany moduł MES

Oprogramowanie	Producent
CATIA V4/V5	Dassault Systenies
SolidWorks Office Premium	Dassault Systenies
Pro/ENGINEER	Parametric Technology Corporation
T-FLEX Parametric CAD	Top Systems
NX	Siemens PLM Solutions

7.3. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 7.

1. Wymień podstawowe kryteria stosowane podczas obliczeń wytrzymałościowych.
2. Podaj ogólne założenia MES.
3. Na czym polega dyskretyzacja obiektu w MES?
4. Co oznacza pojęcie „stopień swobody”?
5. Wymień i scharakteryzuj podstawowe rodzaje elementów przestrzennych (3D) stosowanych w MES.
6. Czym różnią się od siebie elementy pierwszego i drugiego rzędu?

7. Scharakteryzuj zakres zastosowania MES.
8. Podaj wady i zalety MES.

8. Podstawy renderingu

8.1. Cel renderingu

Rendering (renderowanie lub obrazowanie) jest procesem tworzenia obrazu na ekranie na podstawie modelu cyfrowego. Rendering może przeprowadzić praktycznie każdy program CAD, jednak naprawdę dobre efekty uzyskuje się, wykorzystując oprogramowanie dedykowane specjalnie do tego celu. Przykładami profesjonalnych programów do renderingu mogą być 3D Studio Max, LightWave, Maya czy Softimage 3D.

Głównym celem renderingu jest zamodelowanie cyfrowe oddziaływania między materią a światłem. Przed przejściem do fazy renderingu konieczne jest przypisanie do obiektów odpowiednich atrybutów, w szczególności trzeba określić:

(1) algorytm renderingu,
(2) tekstury powierzchni i związane z nimi opcje dodatkowe,
(3) parametry oświetlenia.

Dodatkowymi opcjami, w pewnym stopniu skorelowanymi z powyższymi atrybutami, są:

- postać pliku wyjściowego, który może być obrazem statycznym lub klipem filmowym (również jego rozdzielczość i format),
- szczegóły ustawienia, ruchu i wzajemnych relacji geometrycznych pomiędzy wirtualną kamerą a renderowanym obiektem.

W programie CAD rendering służy do wykonywania prezentacji obiektów jeszcze przed fazą ich produkcji. Znajduje szerokie zastosowanie w przygotowywaniu dokumentacji marketingowej i może służyć do weryfikacji strony wizualnej projektowanego

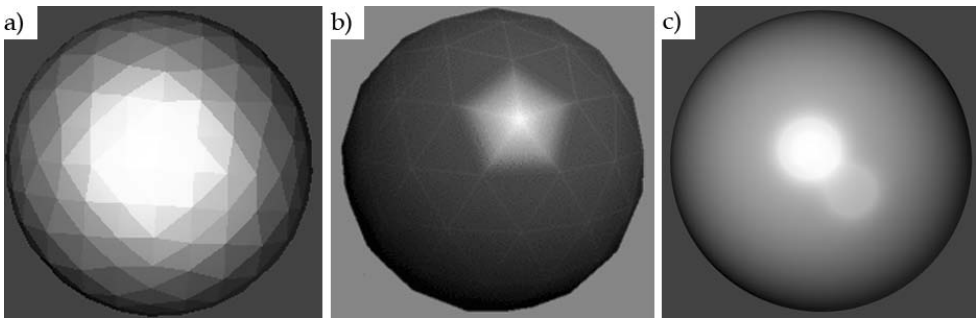
obiektu. Umożliwia nadawanie obiektom bryłowym faktur i kolorów imitujących rzeczywisty wygląd, co ułatwia dobór materiałów. Rendering umożliwia osadzenie modelu cyfrowego na dowolnym tle rastrowym (jednolitym, gradientowym lub na tle fotografii) oraz dodawanie dodatkowych elementów uzupełniających scenerię (drzewa, mgła itp.).

8.2. Podstawowe algorytmy renderingu

Najważniejsze metody renderingu to:

- cieniowanie płaskie (ang. *flat shading*),
- cieniowanie Gourauda (lub cieniowanie na zasadzie interpolowania jasności),
- cieniowanie Phonga (lub cieniowanie z interpolacją wektora normalnego),
- śledzenie promieni (ang. *ray-tracing*),
- metoda energetyczna (ang. *radiosity*).

Na rysunku 56 porównano metody cieniowania płaskiego, Gourauda oraz Phonga na najtrudniejszym do renderingu obiekcie krzywoliniowym.



Rysunek 73. Porównanie metod renderingu: a) cieniowanie płaskie, b) cieniowanie Gourauda, c) cieniowanie Phonga

W cieniowaniu płaskim oraz w cieniowaniu Gourauda powierzchnia obiektu jest dzielona na powierzchnie elementarne (najczęściej trójkąty), w cieniowaniu Phonga kolor jest obliczany oddzielnie dla każdego piksela.

Cieniowanie płaskie pozwala się zorientować, nie obciążając zbytnio procesora, jak będzie wyglądał obiekt. Ta metoda polega na przyporządkowywaniu kolejnym powierzchniom elementarnym jednego poziomu jasności oraz jednej barwy. Zazwyczaj do operacji cieniowania płaskiego wybiera się te wierzchołki, które znajdują się najbliżej obserwatora. Innymi słowy, każdemu trójkątowi przypisuje się, niezależnie od otaczających go wielokątów, jeden ściśle określony odcień. Cieniowanie płaskie jest najmniej kosztowne obliczeniowo i daje dość nieciekawy efekt kanciastości obiektów wynikający z gwałtownych zmian jasności przylegających do siebie trójkątów. Widać to szczególnie wyraźnie na okrągłych przedmiotach, takich jak kula czy torus.

Następny poziom to cieniowanie Gourauda (zwane też cieniowaniem na zasadzie interpolowania jasności). Polega na przypisywaniu kilku punktom cieniowanego wielokąta jasności obliczonej przez interpolację wartości odpowiednich dla każdego wierzchołka (w odróżnieniu od cieniowania Phonga polegającego na interpolacji wektora normalnego). Algorytm Gourauda przebiega dość szybko i daje „miękki” wygląd obiektów. Jednak wielu szczegółów powierzchni trzeba się raczej domyślić.

Nazwane od imienia autora algorytmu cieniowanie Phonga umożliwia wykorzystanie zaawansowanych możliwości ustawień optycznych parametrów powierzchni, czyli map obić, wypukłości, zaawansowanych tekstur itd. Metoda Phonga jest kosztowniejsza obliczeniowo od metod cieniowania płaskiego i Gourauda, umożliwia jednak uzyskanie lepszych efektów końcowych. Nie daje tak dobrej jakości jak inne, bardziej zaawansowane metody renderingu.

Jednym z zaawansowanych sposobów renderingu jest metoda śledzenia promieni (ang. *ray-tracing*) umożliwiająca wygenerowanie cyfrowego obrazu 3D na podstawie symulacji efektów fizyko-optycznych. W odróżnieniu od metod opisywanych wcześniej kolor wyznaczany jest nie dla obszaru, lecz dla każdego piksela oddzielnie. Aby utworzyć obraz, trzeba zasymulować tyle promieni wychodzących z oka obserwatora, ile jest pikseli na obrazie. Algorytm ray-tracingu w swojej najprostszej formie przebiega następująco:

- Do obiektu przypisywana jest tekstura.
- Z punktu, w którym znajduje się obserwator, wyprowadzany jest wirtualny promień pierwotny przecinający rzutnię (płaszczyznę monitora).
- Wyszukiwany jest najbliższy punkt przecięcia z obiektami znajdującymi się na scenie.
- Dla każdego punktu zdefiniowanego na scenie wyznaczana jest jasność.
- Najczęściej także określa się cienie – w tym celu jest testowana widoczność źródła światła z danego punktu, tj. czy światło nie jest przesłaniane przez jakiś obiekt i jeśli nie – dopiero wówczas wyliczana jest jasność punktu dla tego źródła.

Symulowanie (śledzenie trasy) tzw. wstecznych promieni świetlnych biegnących od oka obserwatora (kamery) do źródła światła. Ray-tracing, mimo swoich zalet, nie jest idealnym sposobem tworzenia fotorealistycznych obrazów. Największy mankament polega na tym, że niezbyt dobrze radzi sobie ze światłem rozproszonym, co objawia się najczęściej ostrymi, nierealistycznie

wyglądającymi krawędziami cieni. Drugą wadą tego algorytmu jest to, że nie da się prawidłowo modelować dyfrakcji i interferencji światła. Algorytm ray-tracingu bywa uzupełniany metodą radiosity (śledzenia promieni światła). Bazuje ona na termodynamicznej teorii przekazywania rozproszonego promieniowania cieplnego oraz na modelu globalnego oświetlenia i odbicia rozproszonego. Algorytm ten nazywa się metodą energetyczną lub częściej – radiosity. Najważniejsza jego zaleta to tworzenie trójwymiarowej mapy oświetlenia bez wyznaczania punktu, w którym znajduje się obserwator. Dzięki temu możliwe jest szybkie przygotowanie różnych perspektyw sceny 3D.

Metody ray-tracingu i radiosity są bardzo kosztowne obliczeniowo.

8.3. Tekstury powierzchni i związane z nimi opcje dodatkowe

Rodzaj materiału decyduje o właściwościach refleksyjnych powierzchni (czasami również o właściwościach emisyjnych powierzchni). Pozwala to modelować obiekty o powierzchniach pochłaniających, matowych, lśniących, błyszczących czy odbijających jak w lustrze. Doborowi podlega kilka istotnych właściwości powierzchni, wybrać można:

- Diffuse, czyli powierzchnię matową, bez żadnych opcji dodatkowych (oprócz koloru),
- Specular, czyli wartość określającą wielkość i intensywność odbić świetlnych,
- Ambient, czyli ilość światła odbijanego od powierzchni, jednak w dość specyficznym ujęciu. Oblicza się światło odbijane równomiernie od wszystkich powierzchni, determinuje to jasność i kolor całej sceny,
- Transparency, czyli przezroczystość,

- Opacity maps, czyli rozkład obszarów przezroczystych i nieprzezroczystych na powierzchni obiektu,
- Reflection mapping, czyli symulowanie odbić na powierzchni obiektów, stosowane wtedy, gdy prawdziwe odbicia nie są konieczne lub ich obliczanie byłoby zbyt kosztowne obliczeniowo,
- Bump map, czyli tzw. mapa wgłębień – w zależności od ustawień może określać wgłębienia lub wypukłości powierzchni,
- Wrapping, czyli sposób owijania kształtów obrazkami [(1) mapowanie cylindryczne, (2) mapowanie sferyczne, (3) mapowanie sześcienne, (4) mapowanie szaderami[79]].

8.4. Parametry oświetlenia

Końcowy widok obiektu będzie dodatkowo zależał od przyjętych parametrów oświetlenia. Można zmieniać jego rodzaj, natężenie i barwę. Istnieje wiele rodzajów światła:

- ambitne – światło tego typu jest obecne w całej scenie. Nie ma źródła ani kierunku;
- directional jest światłem umieszczanym w oddaleniu od obiektu, dobrze imituje światło słoneczne – wydobywa strukturę trójwymiarową renderowanych obiektów;
- spot, znane również jako Point, Bulb itd., to odpowiednik teatralnego reflektora. Umieszcza się je blisko obiektu, dzięki czemu można precyzyjnie wydobyć szczegóły i skupić uwagę na konkretnym punkcie;
- światło z widzialnymi promieniami, wolumetrycznymi cieniami – do zaawansowanych zastosowań.

8.5. Zagadnienia kontrolne do rozdziału 8.

1. Co to jest rendering, na czym polega i do czego służy?
2. Wymień główne algorytmy renderingu.
3. Podaj różnicę między cieniowaniem płaskim a cieniowaniem Phonga.
4. Co to są opcje dodatkowe tekstur? Wymień kilka przykładów.
5. Wymień i scharakteryzuj rodzaje oświetlenia.

9. Spis ważniejszych formatów plików wykorzystywanych w programach CAD

Poniżej zestawiono rozszerzenia ważniejszych formatów plików używanych w programie CAD. Oprócz typowych formatów stosowanych w wybranych aplikacjach CAD (tzw. natywnych) zestawiono również formaty wymiany danych, formaty służące do publikacji, formaty kopii zapasowych itp. Przy formatach opisywanych wcześniej zamieszczono krótką informację oraz odsyłacz z numerem strony, na której zamieszczono opis.

3DS – format natywny programu Autodesk 3DStudioMax służącego do animacji i renderingu (inne formaty plików wykorzystywane w 3D Studio: PRJ, ASC, ASE).

ASM – Pro-Engineer, format do zapisu złożeń (wykorzystywany także w Solid Edge).

BAK – format dla kopii zapasowej AutoCAD. Podczas każdorazowego zapisu AutoCAD automatycznie tworzy lub uaktualnia co określoną liczbę minut dodatkowy plik z tym rozszerzeniem. Zawiera te same informacje co plik DWG.

BMP – format nieskompresowany służący do prezentacji grafiki rastrowej 2D (wykorzystywany w przygotowywaniu prezentacji).

BREP – rozszerzenie natywne kernela Open Cascade (tabela 20).

CATPART – CATIA, format do zapisu części.

CATPRODUCT – CATIA, format do zapisu złożeń.

CKD – CADKEY, format do zapisu złożeń.

DGN – DesiGN file, natywny format pliku dla MicroStation produkcji Bentley Systems (oprogramowania CAD).

DRW – Pro-Engineer, format do zapisu rysunków (dokumentacji płaskiej).

DWF (Design Web Format) – format firmowy Autodesk do publikacji rysunków i obiektów 3D w Internecie (opis w tabeli 33).

DWG – podstawowy format pliku wersji AutoCAD (1982 – 2009) oraz format rysunku Inventora od wersji 2009. Od początku lat 80. XX wieku sporządzono kilkanaście jego wersji. Najnowsza wersja to AC1021 opracowana w latach 2007 – 2008 (por. podpunkt 6.5).

DWT – szablon rysunku AutoCAD (od wersji R14 – 1997 rok), zawiera te same informacje co DWG.

DXF (Drawing Interchange File) – format wymiany danych CAD (opis w podpunkcie 6.5).

FBX – format Autodesk do wymiany danych między aplikacjami tej firmy (m.in. Autodesk Maya, 3DS Max & VIZ oraz Autodesk MotionBuilder, dla którego jest formatem natywnym).

HPGL (lub HP-GL) – Hewlett-Packard Graphics Language, język obsługi drukarki stosowany w ploterach firmy Hewlett-Packard. Obecnie jest standardem dla prawie wszystkich ploterów.

IAM – Autodesk Inventor, format złożenia.

IDI – Ideas (NX), natywny format pliku.

IDW – Autodesk® Inventor, format rysunku (dokumentacji płaskiej).

IDZ – Ideas (NX), natywny format pliku.

IPT – Autodesk® Inventor, format części (do wersji 2008).

JPG – format skompresowany stratnie służący do prezentacji grafiki rastrowej 2D (wykorzystywany w przygotowywaniu prezentacji).

MCA – Ideas (NX), natywny format pliku.

PDF (Portable Document Format) – format do prezentacji, publikacji i drukowania treści tekstowo-graficznych utworzony przez firmę Adobe Systems. Format (opis w tabeli 33).

PRT – Pro-Engineer, format do zapisu części (wykorzystywany również w CADKEY).

NEU – Pro-Engineer, format do zapisu neutralnych złożeń.

SAT, SAB – natywny format kernela ACIS (tabela 20 oraz tabela 21).

SLDASM – SolidWorks, format do zapisu złożeń.

SLDDRW – SolidWorks, format do zapisu rysunków (dokumentacji płaskiej).

SLDPRT – SolidWorks, format do zapisu części.

STP, STEP – uniwersalny format wymiany danych, opis w podpunkcie 6.4.

U3D (Universal 3D) – format programu Acrobat 3D firmy Adobe Systems przeznaczony do zapisu plików CAD w formie trójwymiarowych interaktywnych prezentacji z opcjami obracania, powiększania i wyświetlania przekrojów. Pliki U3D można otwierać w programie Adobe Reader.

WMF – Windows Metafile, format pliku zawierającego grafikę wektorową i rastrową.

WRL, **WRZ**, **VRML** (Virtual Reality Modelling Language) – format do zapisu wektorowej grafiki 3D dedykowany do publikacji w Internecie.

x_b, x_t – rozszerzenia kernela Parasolid (tabela 20 oraz tabela 21).

X3D – standard ISO wprowadzony w 2004 roku, służący do zapisu grafiki 3D, bazuje na formacie XML, oferując nowe możliwości, m.in. zapis krzywych i powierzchni NURBS. Format zastępujący Virtual Reality Modeling Language (VRML).

XML (eXtensible Markup Language) – rozszerzalny język znaczników – zredukowana wersja SGML (Standard Generalized Markup Language [ISO 8879]), służy do wymiany dokumentów.

10. Przydatne linki

1. www.we-r-here.com/cad/tutorials/index.htm – kurs programu AutoCAD oparty na wersji 2008 podzielony na cztery bloki (poziomy) zawierający łącznie 48 lekcji (język angielski) [dostęp 30.03.2008]
2. http://students2.autodesk.com – Student Engineering and Design Community – portal dla studentów kierunków inżynierskich. Zawiera materiały szkoleniowe, forum, biblioteki projektów, oferty pracy oraz możliwe do pobrania profesjonalne narzędzia CAD firmy Autodesk (m.in. AutoCAD Mechanical i Autodesk Inventor w polskich wersjach językowych). Rejestracja jest bezpłatna. Warunkiem jest posiadanie konta pocztowego w domenie uczelnianej (np. domenie „au.poznan.pl", „put.poznan.pl", „edu", „edu.pl" – przykładowy adres e-mail imie.nazwisko@au.poznan.pl) [dostęp 30.03.2008]
3. www.cad.pl/kursy/ – kursy: AutoCAD 2000 (trzy poziomy oraz dodatkowo kurs VBA i DCL), Inventora 4 (2000/2001) oraz CATIA v5 (1999) (język polski) [dostęp 30.03.2008]
4. www.tracepartsonline.net – tysiące bezpłatnych cyfrowych modeli części maszyn w uniwersalnych formatach CAD (m.in. SAT; x_t; DXF) oraz w natywnych formatach programów, takich jak: Alibre Design, Architectural Desktop, AutoCAD, CATIA, CoCreate, HiCAD, IntelliCAD, Inventor, IronCAD, KeyCreator, KOMPAS, MegaCAD, MicroStation, Pro/ENGINEER, Solid Designer, Solid Edge, SolidWorks, thinkdesign, TopSolid, TurboCAD, Unigraphics [dostęp 30.03.2008].

11. Dodatek – przykładowe zestawy pytań sprawdzających

W dodatku zaproponowano sprawdzian stopnia opanowania zagadnień teoretycznych z zakresu CAD będący podstawą m.in. do wystawienia zaliczenia z przedmiotu. Załączono dwa przykładowe testy. Każdy test składa się z dziesięciu pytań, na każde pytanie podano trzy odpowiedzi, z których jedna, dwie lub trzy są prawidłowe. Istnieje zatem statystycznie siedem możliwości konfiguracji odpowiedzi, z których tylko jedna jest prawidłowa (a, b, c, ab, ac, bc, i abc).

Tabela 39. Test 1

1. Co oznacza skrót CIM? a komputerowo zintegrowane wytwarzanie b inżynieria wspomagana komputerowo c komputerowe wspomaganie wytwarzania	
2. W programach CAD wykorzystuje się układy współrzędnych: a prostokątny, biegunowy i cylindryczny b kartezjański, lokalny i jednoosiowy c kartezjański, stożkowy i prostokątny	
3. Geometryczny model powierzchniowy 3D składa się: a tylko z powierzchni b z powierzchni i z punktów c z powierzchni z punktów i linii	
4. Na bryłach CGS można wykonywać następujące operacje algebry Boole'a: a suma, różnica, iloczyn b suma, różnica, część wspólna	

c tylko suma i różnica	
5. Możliwe jest w pełni automatyczne przekonwertowanie modelu: a krawędziowego w bryłowy b bryłowego w krawędziowy c powierzchniowego w bryłowy	
6. Relacje powiązań między obiektami (np. płaszczyznami, liniami) to: a zależności zwrotne b układ elementów c więzy (geometryczne lub postaciowe)	
7. Co oznacza pojęcie asocjatywności w programie CAD? a powiązanie informacyjne pomiędzy plikami, np. rysunków i modeli b zdolność do łączenia części w zespoły c zdolność programów do współdziałania	
8. Co oznacza pojęcie asocjatywności w programie CAD? a powiązanie informacyjne pomiędzy plikami, np. rysunków i modeli b zdolność do łączenia części w zespoły c zdolność programów do współdziałania	
9. Parasolid to: a kernel stosowany w programie AutoCAD b jedno z dwóch najbardziej rozpowszechnionych jąder CAD c rodzaj nakładki na programy CAD	
10. Czy można przenosić dane (pliki) między różnymi programami CAD? a w 99% przypadków nie jest to możliwe b tylko wtedy, kiedy są to programy jednej firmy c tak. np. zapisując pliki w jednym z uniwersalnych formatów wymiany danych	

Tabela 40. Test 2

1. Co oznacza skrót CAE? a komputerowe wspomaganie projektowania b inżynieria wspomagana komputerowo c komputerowe wspomaganie wytwarzania	
2. Co oznacza pojęcie „więzy"? a obligatoryjny schemat modelowania b ograniczenia geometryczne i kinematyczne obiektów c ograniczenia i warunki przypisane obiektom cyfrowym	
3. Rozróżniamy następujące rodzaje modeli geometrycznych 3D: a krawędziowe, powierzchniowe, bryłowe b szkieletowe, geometryczne, objętościowe c proste, hybrydowe, mieszane	
4. Program NC jest: a programem sterującym obrabiarką CNC b programem sterującym robotem przemysłowym c programem głównym systemu C AD	
5. Co oznacza pojęcie „drzewo strukturalne modelu" (drzewo konstrukcji lub drzewo topologiczne)? a szczegółowy opis budowy modelu w formie pliku tekstowego b forma graficznej prezentacji struktury modelu CSG i B-rep c instrukcja technologiczna dołączana do modelu	
6. Istnieją następujące rodzaje programowania obrabiarek CNC: a ręczne, maszynowe. CAD/CAM b nie ma podziału na rodzaje - jest tylko jeden rodzaj programowania c obrabiarek CNC się nie programuje	
7. Cykl życia wyrobu to: a okres jego użytkowania przez klienta końcowego b czas, jaki upływa między koncepcją a unicestwieniem wyrobu c czas, kiedy wyrób jest wytwarzany	
8. Najlepszym formatem wymiany danych między programami CAD wykorzystującymi kemel Parasolid jest plik z rozszerzeniem:	

a *.dwg lub *.sat b dowolny (wszystkie formaty obsługiwane przez te programy są równie dobre) c *.x t lub *.x b	
9. Kemel to: a jeden z modułów programu CAD b tzw. modeler, czyli jądro modelowania geometrycznego programu C Ax c podstawowa część programu CAx	
10. STEP to: a tzw. uniwersalny (neutralny) format wymiany danych CAD b rodzaje plików rastrowych (do zapisu grafiki) c zalecany format pliku do długoterminowej archiwizacji danych CAD	

12. Spis tabel i ilustracji

Spis tabel

Tabela 1. Ogólna charakterystyka wejść i wyjść wybranych maszyn (za [Dietrych 1968 i 1974])
Tabela 2. Rzutowanie prostokątne równoległe
Tabela 3. Rzutowanie aksonometryczne
Tabela 4. Rzutowanie perspektywiczne środkowe
Tabela 5. Podziałki według PN-EN ISO 5455:1998
Tabela 6. Formaty arkuszy według PN-EN ISO 5457:2002
Tabela 7. Rodzaje i podstawowe przeznaczenie linii według PN-EN ISO 128-20:2002)
Tabela 8. Grubości linii stosowane na rysunkach technicznych według PN-EN ISO 128-20:2002
Tabela 9. Zalecane wysokości pisma do stosowania w dokumentacji technicznej
Tabela 10. Klasyfikacja funkcjonalna podsystemów CIM
Tabela 11. Wykorzystanie technik CAD w projektowaniu technicznym
Tabela 12. Oprogramowanie do zarządzania dokumentacją techniczną (PDM) oraz zarządzania cyklem życia produktu (PLM) dostępne w Polsce
Tabela 13. Porównanie układów współrzędnych stosowanych w CAD
Tabela 14. Charakterystyka podstawowych modeli cyfrowych
Tabela 15. Narzędzia do konwersji rysunków 2D na modele 3D (opracowano na podstawie dokumentacji SolidWorks 2007)
Tabela 16. Więzy postaciowe w wybranych programach CAD
Tabela 17. Więzy wymiarowe w wybranych programach CAD
Tabela 18. Wybrane powierzchnie drugiego stopnia
Tabela 19. Ważniejsze systemy CAD oraz CAM popularne w Polsce

Tabela 20. Ważniejsze kernele CAx
Tabela 21. Zestawienie ważniejszych aplikacji CAx zbudowanych na kernelach ACIS i Parasolid
Tabela 22. Porównanie granicznych wielkości modeli dla kerneli ACIS i Parasolid
Tabela 23. Przykładowe wymagania sprzętowe wybranych aplikacji CAx dla systemu operacyjnego Windows XP 64 bit (według danych producentów, stan na kwiecień 2008 roku)
Tabela 24. Możliwości importu i eksportu formatów plików przez wybrane programy CAD
Tabela 25. Tabela wymiany danych dla SolidWorks Office Professional 2008 (opracowano na podstawie www.solidworks.pl, 19.03.2008)
Tabela 26. Tabela wymiany danych dla Solid Edge v20 (opracowano na podstawie www.solidedge.nicom.pl, 20.05.2008)
Tabela 27. Formaty wymiany danych wybranych kerneli CAD
Tabela 28. Neutralne formaty wymiany danych CAD
Tabela 29. Struktura pliku IGES (opis w tekście)
Tabela 30. Zalecana dokładność geometryczna ustalana w trakcie konwersji do formatu STEP
Tabela 31. Komercyjne formaty wymiany danych CAD
Tabela 32. Struktura pliku DXF
Tabela 33. Formaty do publikacji danych
Tabela 34. Przeglądarki plików z grafiką inżynierską
Tabela 35. Możliwości eksportu i importu danych dla wybranych programów CAD/CAM
Tabela 36. Zalecenia dotyczące zastosowań ważniejszych rodzajów elementów skończonych (opracowano na podstawie www.cae.info.pl, dostęp 19.05.2008)
Tabela 37. Przykłady zewnętrznych pakietów MES możliwych do zintegrowania z oprogramowaniem CAD
Tabela 38. Przykłady oprogramowania CAD zawierającego wbudowany moduł MES
Tabela 39. Test 1
Tabela 40. Test 2

Spis ilustracji

Rysunek 1. Proces projektowania a proces zaspokajania potrzeb (na podstawie [Tarnowski 1998])
Rysunek 2. Cykl życia wyrobu: a) klasyczny, b) zintegrowany
Rysunek 3. Proces projektowania [Jones 1977]
Rysunek 4. Układy elementarnych zabiegów procesu (na podstawie [Dietrych 1974]): a) cykl sekwencyjny, b) cykl sekwencyjno-iteracyjny
Rysunek 5. Kolejność doboru cech konstrukcyjnych (na podstawie [Rydzanicz 1995])
Rysunek 6. Model środka technicznego (artefaktu)
Rysunek 7. Rzutowanie metodą europejską: a) rzutowany przedmiot, b) układ rzutów
Rysunek 8. Rzut główny i pomocniczy widok izometryczny
Rysunek 9. Przykłady rysunków rozstrzelonych: a) kątowe połączenie meblowe, b) obudowa łożyskowania mechanizmu różnicowego
Rysunek 10. Czcionka stosowana w dokumentacji CAD
Rysunek 11. Schemat zarządzania cyklem życia produktu (PLM)
Rysunek 12. Model CIM (opracowano na podstawie [Waldner 1992] oraz [Tóth i Erdélyi 2006])
Rysunek 13. Proces projektowania i wytwarzania wspomagany komputerowo
Rysunek 14. Kierunek przepływu informacji technicznej w przedsiębiorstwie
Rysunek 15. Otoczenie informacyjne CAD
Rysunek 16. Przykłady elementów geometrycznych
Rysunek 17. Hierarchiczna budowa obiektów – obiekt 2D zbudowany z trzech obiektów 1D
Rysunek 18. Układy współrzędnych stosowane na płaszczyźnie: a) prostokątny, b) biegunowy
Rysunek 19. Zależności pomiędzy układami współrzędnych: prostokątnym a biegunowym

Rysunek 20. Prawoskrętny prostokątny układ współrzędnych stosowany w przestrzeni: a) układ osi, b) reguła prawej dłoni
Rysunek 21. Przestrzenne układy współrzędnych: a) walcowy, b) sferyczny
Rysunek 22. Układ automatycznie wygenerowanych warstw w AutoCAD Mechanical
Rysunek 23. Modele cyfrowe: a) z wokseli, b) fraktalny
Rysunek 24. Niejednoznaczność modelu krawędziowego
Rysunek 25. Idea modelu powierzchniowego: a) model powierzchniowy klina, b) widok rozstrzelony
Rysunek 26. Porównanie modelu powierzchniowego z bryłowym
Rysunek 27. Reprezentacja wielokątowa powierzchni: a) obiekt przed triangulacją, b) obiekt triangulowany
Rysunek 28. Płat powierzchni zdegenerowanej
Rysunek 29. Tworzenie elementarnych powierzchni typu NURBS: a) punkty, b) splajn, c) grupa splajnów, d) powierzchnia typu NURBS
Rysunek 30. Grupy prymitywów
Rysunek 31. Wybrane prymitywy trójwymiarowe: a) prostopadłościan, b) kula, c) walec, d) stożek, e) klin, f) toroid
Rysunek 32. Podstawowe operacje algebry Boole'a: a) suma, b) różnica, c) iloczyn (część wspólna)
Rysunek 33. Przykład zastosowania operacji Boole'a
Rysunek 34. Modele B-rep: a) prostopadłościan, b) prostopadłościan z otworem
Rysunek 35. Struktura oprogramowania FBM
Rysunek 36. Struktura cechy konstrukcyjnej (ang. *feature*)
Rysunek 37. Przykłady cech konstrukcyjnych
Rysunek 38. Okno dialogowe do wykonywania otworów w programie CATIA V5R18
Rysunek 39. Wykonanie przejścia promieniem 10 mm pomiędzy stycznymi powierzchniami modelu bryłowego (CATIA V5R18): a) powierzchnie przed wykonaniem zaokrąglenia, b) powierzchnie po zaokrągleniu
Rysunek 40. Przykład Feature Based Modeling w zastosowaniu do rysunku 2D (Autodesk Mechanical Desktop): a) model, b)

drzewo konstrukcji
Rysunek 41. Struktura modelu (SolidWorks 2007): a) drzewo strukturalne modelu, b) model FBM
Rysunek 42. Przykład reguły dla otworu
Rysunek 43. Płaszczyzny konstrukcyjne: a) główne, b) zdefiniowane przez użytkownika
Rysunek 44. Szkic części obrotowej: a) szkic do wykonania modelu cyfrowego, b) rysunek wykonawczy wygenerowany z modelu cyfrowego
Rysunek 45. Model cyfrowy wykonany przez obrót profilu; a) o 360 , b) o 180 symetrycznie względem płaszczyzny szkicu 76
Rysunek 46. Wyciągnięcie profilu na długość 50: a) proste, b) ze zwężeniem 8 76
Rysunek 47. Wyciągnięcie przez dwa szkice: a) szkice, b) efekt wyciągnięcia 77
Rysunek 48. Wyciągnięcie przez trzy szkice leżące na płaszczyznach ustawionych pod kątem: a) szkice, b) efekt wyciągnięcia
Rysunek 49. Wyciągnięcie po ścieżce: a) szkic i ścieżka, b) efekt wyciągnięcia
Rysunek 50. Wyciągnięcie po ścieżce pomiędzy dwoma przekrojami: a) przekroje i ścieżka, b) efekt wyciągnięcia
Rysunek 51. Przypisanie grubości modelowi powierzchniowemu: a) model powierzchniowy, b) model powierzchniowy z grubością
Rysunek 52. Modelowanie sprężyn przez wyciąganie przekroju po helisie: a) sprężyna walcowa prawa o stałym skoku, b) sprężyna walcowa lewa o stałym skoku, c) sprężyna walcowa prawa o zmiennym skoku, d) sprężyna stożkowa prawa o stałym skoku, e) sprężyna stożkowa prawa o zmiennym skoku
Rysunek 53. Składanie rzutów w obiekt 3D – porównanie metod rzutowania: europejskiej i amerykańskiej
Rysunek 54. Więzy postaciowe i wymiarowe w szkicu: a) cztery odcinki bez więzów, b) odcinki po przypisaniu geometrycznych więzów przynależności, c) odcinki po przypisaniu geometrycznych

więzów równoległości względem osi pionowej i poziomej, d) sytuacja po przypisaniu więzów wymiarowych kąta i długości
Rysunek 55. Parametryzacja szkicu
Rysunek 56. Powierzchnie drugiego stopnia: a) elipsoid, b) sfera, c) wymiary elipsoidu, d) torus
Rysunek 57. Rodzina elipsoid
Rysunek 58. Klasyfikacja oprogramowania CAx stosowanego w branży mechanicznej
Rysunek 59. Historia wymiany danych
Rysunek 60. Typowa przemysłowa siatka powiązań
Rysunek 61. Niewspółliniowość krawędzi po konwersji
Rysunek 62. Utrata nieistotnych szczegółów geometrycznych o wymiarach mniejszych od tolerancji geometrycznej modelu (na górze przed konwersją, na dole po konwersji): a) połączenie dwóch krawędzi (a4 z a3); b) usunięcie krawędzi (b3)
Rysunek 63. Pełna interoperacyjność między czterema systemami CAD osiągana za pomocą dwunastu konwerterów
Rysunek 64. Wymiana danych pomiędzy sześcioma systemami CAD: a) za pomocą 30 translatorów, b) za pomocą 12 translatorów i formatu STEP
Rysunek 65. Procedura konwersji z wykorzystaniem STEP
Rysunek 66. Typowy przebieg procesu projektowania programów NC w systemach CAD/CAM
Rysunek 67. Wybrane elementy skończone pierwszego rzędu
Rysunek 68. Przykłady elementów drugiego rzędu
Rysunek 69. Przykład dyskretyzacji obiektu ciągłego: a) widok, b) widok rozstrzelony
Rysunek 70. Przykład wykorzystania symetrii geometrii i obciążenia dla modelu półsztywnego połączenia narożnikowego: a) połowa modelu z wygenerowaną siatką elementów skończonych, b) cały model z obciążeniami i warunkami brzegowymi
Rysunek 71. Rozkład naprężeń zredukowanych (według hipotezy Hubera-von Misesa) w kierunku prostopadłym do płaszczyzny styku płyt [Sydor 2005]
Rysunek 72. Przemieszczenie płyt połączenia pod obciążeniem [Sydor 2005]

Rysunek 73. Porównanie metod renderingu: a) cieniowanie płaskie, b) cieniowanie Gourauda, c) cieniowanie Phonga

13. Literatura

1. „Autodesk Inventor Series. Pierwsze kroki”. Dokumentacja programu Autodesk Inventor 10, Autodesk, Inc. USA 2005.
2. „Autodesk Inventor. Pierwsze kroki”. Dokumentacja programu Autodesk Inventor 2008, Autodesk, Inc. USA 2007.
3. Bis Jan; Markiewicz Ryszard, „Komputerowe wspomaganie projektowania CAD – podstawy”, wydawnictwo Rea, Warszawa 2008, 152 strony.
4. Bober Aleksander; Dudziak Marian, „Zapis konstrukcji”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999, 263 strony.
5. Branowski Bogdan, „Maszyny i ich układy napędowe [w]: Branowski B. (red.) „Podstawy konstrukcji napędów maszyn”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007, s. 24 – 42.
6. Branowski Bogdan, „Metody twórczego rozwiązywania problemów inżynierskich”. Seria „nowe konstrukcje – nowe technologie” Prace naukowe, tom 1. Wydawnictwo Wielkopolska Korporacja Techniczna NOT 1999, 195 stron.
7. Branowski Bogdan (red.), „Wprowadzenie do projektowania”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998, 250 stron.
8. „Design News Polska 2006”, „CAD/CAE – Postrach projektantów: wymiana danych” 2006 nr 4.
9. Dietrych Janusz, „Konstrukcja i konstruowanie”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1968.
10. Dietrych Janusz, „Projektowanie i konstruowanie”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974.
11. Dietrych Janusz, „System i konstrukcja”, wyd. 2, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
12. Dietrich Marek (red.), „Podstawy konstrukcji maszyn”, t. 1., wyd. 2 zm., Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995, 672[2] strony.

13. Felippa Carlos A., „A historical outline of matrix structural analysis: a play in three acts", „Computers & Structures" 79 (14): 1313 – 1324, 2000 (dostępny on-line www.colorado.edu 19.05.2008).
14. Felippa Carlos A., „Introduction to finite element methods", (ASEN 5007) Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures, University of Colorado, USA 2004.
15. Gasparski Wojciech (red.) „Projektoznawstwo: elementy wiedzy o projektowaniu", Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988, 407[1] stron.
16. Gawrysiak Marek, „Analiza systemowa urządzenia mechatronicznego", Wydawnictwo PB, Białystok 2003, 204 strony.
17. Jones John Humphrey Christopher, „Metody projektowania" [z ang. przeł. Jacek Zielonka] Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977, 431[1] stron.
18. Niezgodziński Michał Edward, Niezgodziński Tadeusz, „Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe", Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996, 300 stron.
19. Patzak Gerold (1982) „Systemtechnik – Planung komplexen Innovativer Systeme, Grundlagen, Methoden, Techniken, Springer Verlag", Berlin 1982, 440 stron.
20. Potts Steves Michelle, Frechette Simon, „Viewing Technologies for Computer-Aided Design Models. Technical Note CMU/SEI-2003-TN-022" 2003 (on-line: www.sei.cmu.edu/ pub/documents/03.reports/pdf/03tn022.pdf 20.03.2008).
21. Raiffa Howard, „Decision Analysis: Introductory Lectures on Choices Under Uncertainty", Random House, New York 1968, 310 stron.
22. Ropohl Günter, „Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik", wyd. 2, Carl Hanser Verlag, München, Niemcy 2004, 360 stron.
23. Rydzanicz Igor, „Zapis konstrukcji. Zadania". Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995, 147 stron.

24. Skarka Wojciech, Mazurek Andrzej, „CATIA. Podstawy modelowania i zapisu konstrukcji”, wydawnictwo Helion, Warszawa 2005, 352 strony.
25. Skarka Wojciech, „Modelowanie bazy wiedzy dla budowy modeli autogenerujacych w systemie CATIA z zastosowaniem języka UML”, XLVI Sympozjon „Modelowanie w mechanice”, Wisła (26.02 – 2.03.2007, (CD).
26. Smardzewski Jerzy, „Komputerowo zintegrowane wytwarzanie mebli”, PWRiL, Poznań 2007, 306 stron.
27. Sydor Maciej, „Właściwości konstrukcyjne półsztywnych połączeń płyt drewnopochodnych”, rozprawa doktorska pod kier. B. Branowskiego. Maszynopis. WMRT, Politechnika Poznańska, Poznań 2005, 190 stron.
28. Sydor Maciej, „Drewno w budowie maszyn. Historia najważniejszego tworzywa”, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, Poznań 2008, 382 strony.
29. Tarnowski Wojciech, „Podstawy projektowania technicznego” [współaut. Tomasz Kiczkowiak, Bogusław Jacek Siwek, Grzegorz Świderski], Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997, 261 stron.
30. Tóth Tibor, Erdélyi Ferenc, „Systems Engineering: A New Approach to Complex IT-based Technological Systems in Engineering Education”, „Journal of Universal Computer Science”, vol. 12, no. 9 2006, 1393 – 1404.
31. Waldner Jean-Baptiste, „CIM: Principles of Computer-integrated Manufacturing” [tłum. z francuskiego W.J. Duffin] wyd. John Wiley & Sons, Chicester 1992.
32. Winkler Teodor, „Komputerowy zapis konstrukcji”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997, 141 stron.

Normy

1. PN-EN ISO 10209-2:2001 Dokumentacja techniczna wyrobu. Terminologia. Część 2: Terminy dotyczące metod rzutowania.
2. PN-EN ISO 128-20:2002 Rysunek techniczny. Zasady ogólne przedstawiania. Część 20: Wymagania podstawowe dotyczące linii.

3. PN-EN ISO 128-21:2006 Rysunek techniczny. Zasady ogólne przedstawiania. Część 21: Linie w systemach CAD.
4. PN-EN ISO 13567-1:2004 Dokumentacja techniczna wyrobu. Organizacja i nadawanie nazw warstwom w systemie CAD. Część 1: Zasady ogólne.
5. PN-EN ISO 3098-5:2002 Dokumentacja techniczna wyrobu. Pismo. Część 5: Pismo alfabetu łacińskiego, cyfry i znaki w projektowaniu wspomaganym komputerowo (CAD).
6. PN-EN ISO 3098-5:2002 Dokumentacja techniczna wyrobu. Pismo. Część 5: Pismo alfabetu łacińskiego, cyfry i znaki w projektowaniu wspomaganym komputerowo (CAD).
7. PN-EN ISO 5455:1998 Rysunek techniczny. Podziałki.
8. PN-EN ISO 5457:2002 Dokumentacja techniczna wyrobu. Wymiary i układ arkuszy rysunkowych.
9. PN-ISO 129:1996 Rysunek techniczny. Wymiarowanie. Zasady ogólne. Definicje. Metody wykonania i oznaczenia specjalne.

www

1. www.top500.org – ranking 500 najszybszych superkomputerów (8.05.2008).
2. www.autodesk.com – strona firmy Autodesk (1.07.2008).
3. www.msipolska.pl – Mistrzowie wagi lekkiej. Roberto Michel, MBT USA, maj 2007 (3.07.2008).
4. www.autor.com.pl – Design News Polska (7.07.2008).
5. www.knse.pl – Koło Naukowe Solid Edge (19.05.2008).

O Autorze

Maciej Sydor jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym na Wydziale Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, doktorem nauk technicznych, autorem trzech monografii. W latach 2001-2004 był wykładowcą przedmiotu rysunek techniczny, a od 2005 roku wykłada podstawy CAD. Współpracuje z Politechniką Poznańską oraz z Państwową Wyższą Szkołą Zawodową w Pile.

Przypisy

[1] Jedną z ważniejszych miar mocy obliczeniowej, zwłaszcza w odniesieniu do superkomputerów przeznaczonych do złożonych obliczeń inżynierskich, jest flop/s (ang. *FLoating Operations Per Second*), czyli liczba operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę.
[2] Gordon Earl Moore (ur. 1929) – współzałożyciel korporacji Intel, największego na świecie producenta układów scalonych.
[3] Nie oznacza to, że podwaja się moc obliczeniowa całego komputera. Prawu Moore'a nie podlegają np. latencja dysków twardych i pamięci RAM (w przeciwieństwie do rozmiarów ich pamięci). Moc obliczeniowa mikroprocesorów podwaja się co ok. 1,5 – 2 lat od połowy lat 70. XX wieku, według Moore'a proces ten zwolni ok. roku 2009, kiedy rozmiary tranzystorów w procesorach osiągną wartość mniejszą od 45 nm.
[4] Więcej o szczegółowych wymaganiach dla informacji projektowej w podpunkcie 1.4.
[5] CAD – Computer Aided Design, CAM – Computer Aided Manufacturing, CAE – Computer Aided Engineering, PLM – Product Lifecycle Management (vide „Słownik ważniejszych terminów CAx").
[6] Zadania krytyczne – zadania, których ukończenie warunkuje możliwość rozpoczęcia kolejnego zadania (w odróżnieniu od zadań niekrytycznych). Zadania krytyczne nie mogą przebiegać współbieżnie.
[7] Najstarsza znana definicja maszyny brzmi: „Maszyna to zwarty zespół części drewnianych wykazujący wszelkie zalety przy podnoszeniu ciężarów. Maszynę wprawia się sztucznie w ruch za pomocą kół" (Marcus Vitruvius, ok. 20 r. p.n.e.). Najstarsza polskojęzyczna definicja brzmi: „Machina. Związánie iákie misterne z drzewá albo in zej máteryi" (Stanisław Solski 1690) (za [Sydor 2008]).

[8] Tradycyjne podejście do testowania hipotez statystycznych, wywodzące się od Jerzego Neymana i Egona Pearsona, posługuje się dwoma rodzajami błędów: pierwszego rodzaju i drugiego rodzaju. W 1957 roku statystyk Allyn W. Kimball zaproponował wprowadzenie błędu trzeciego rodzaju polegającego na prawidłowym metodycznie rozwiązaniu niewłaściwego problemu [Raiffa 1968, s. 264 – 265].
[9] W zasadzie można jeszcze sformułować błąd piątego rodzaju polegający na zastosowaniu niewłaściwego narzędzia do niewłaściwie sformułowanego problemu…
[10] W przypadku materiałów anizotropowych (np. drewna) liczba właściwości konstrukcyjnych może przekroczyć 200 (!) [Sydor 2008].
[11] Vide „Słownik ważniejszych terminów CAx".
[12] Dodatkowo można wyróżnić pliki prezentacji multimedialnych.
[13] Asocjatywnie, czyli z dwukierunkowym przepływem informacji.
[14] Rzutowanie jest metodą odwzorowania na płaszczyźnie obiektów trójwymiarowych. Obiektowi rzutowanemu przyporządkowuje się figurę płaską przedstawioną na tzw. płaszczyźnie rzutu. Figura ta jest tworzona w taki sposób, że przez każdy punkt rzutowanej figury przechodzi prosta rzutująca, a punkty przecięcia tych prostych z płaszczyzną rzutu wyznaczają figurę płaską (rzut). Rzutować można na kilka płaszczyzn rzutu.
[15] W części literatury nazywane rzutowaniem prostokątnym.
[16] W części literatury nazywane izometrią lub rzutowaniem izometrycznym.
[17] Nie należy mylić pojęcia planometria (metoda rzutowania) z planimetrią (dział geometrii).
[18] W części literatury nazywane nieco nieprecyzyjnie rzutowaniem perspektywicznym.
[19] Pierwsze udane próby modelowania obiektów 3D miały miejsce w 1972 roku (program SynthaVision firmy Mathematics Application Group, Inc. do analiz promieniowania). Pierwsze próby modelowania 3D w CAD miały miejsce w 1978 roku (modeler PADL autorstwa Herba Voelckera) [źródło: „CAD software – history of CAD CAM", www.cadazz.com, dostęp 7.07.2008].

[20] Vide rozdział 4.
[21] Pierwsze opracowania dotyczące wykorzystania „cech konstrukcyjnych” (ang. *features*) pochodzą z początku lat osiemdziesiątych; eksperymentalny program CAD o nazwie Build, który opracował Lyc Kyprianou w 1980 roku, wykorzystywał predefiniowane cechy konstrukcyjne do tworzenia modeli B-rep (boundary representation model). Zasady modelowania opartego na cechach konstrukcyjnych opisano w podpunkcie 3.5.6.
[22] Główne podobszary PLM to: (1) Product and Portfolio Management (PPM), (2) Computer Aided Product Design (CAx), (3) Manufacturing Process Management (MPM) oraz (4) Product Data Management (PDM).
[23] O parametryzacji napisano szerzej w podpunkcie 4.2 na.
[24] Przykład procesu projektowania wspomaganego komputerem opisano tutaj.
[25] W plikach z grafiką wektorową istnieje możliwość osadzania obiektów rastrowych, najczęściej tekstur powlekających modele trójwymiarowe.
[26] Sposób uporządkowania zależy od rodzaju układu współrzędnych.
[27] Układ współrzędnych prostokątnych (ortokartezjańskich) bazuje na układzie odniesienia określonym przez trzy wzajemnie prostopadłe osie (osie współrzędnych prostokątnych) mające początek w tym samym punkcie (nazywanym początkiem układu) i na jednostkach miary tych osi.
[28] Idea układu współrzędnych kartezjańskich powstała w XVII wieku, jej autorami byli, niezależnie od siebie, dwaj Francuzi – René Descartes (łac. Cartesius) oraz Pierre de Fermat.
[29] Vide „Słownik ważniejszych terminów CAx”.
[30] Por. rozdział 7.
[31] CSG (Constructive Solid Geometry) – geometria oparta na tzw. prymitywach objętościowych, vide podpunkt 3.5.4.
[32] Vide podpunkt 3.5.5.
[33] FBM (Features Based Modeling) – modelowanie oparte na cechach konstrukcyjnych.

[34] Woksel (ang. *voxel*) w grafice 3D jest odpowiednikiem piksela w grafice 2D. Struktura obiektów złożonych z wokseli składa się z elementarnych obiektów prostopadłościennych opisanych współrzędnymi przestrzennymi jednego z ośmiu narożników oraz współrzędnymi punktu środkowego. Taka technika modelowania w zasadzie nie jest stosowana w CAD, znajduje zastosowanie głównie w medycynie do zapisu wyników trójwymiarowego skanowania, np. tomografem.
[35] Według klasyfikacji oprogramowania CAx podanej na rysunku 58.
[36] Torus (łac. – obrączka u spodu kolumny) – powierzchnia powstała przez obrót okręgu dookoła prostej leżącej w płaszczyźnie tego okręgu, lecz nieprzecinającej go. Kształt torusa ma napompowana dętka i obwarzanek.
[37] Toroid – bryła, której powierzchnią jest torus.
[38] W powierzchni orientowalnej można przyjąć jedną stronę za dodatnią, a drugą za ujemną. Jeśli powierzchnia zamyka jakąś objętość, to znak dodatni wyznacza jednostkowy wektor normalny „n" skierowany na zewnątrz zamkniętej objętości (np. powierzchnia zewnętrzna modelu powierzchniowego kuli jest dodatnia, a wewnętrzna ujemna).
[39] Cechy konstrukcyjne (tzw. elementy) to predefiniowane obiekty charakterystyczne, takie jak powierzchnia płaska, powierzchnia walcowa, dwie powierzchnie równoległe, próg, gwint, szczelina, otwór, rowek itd. Liczba elementów zależy od konkretnego programu CAD, w praktyce wynosi od kilku do kilkudziesięciu.
[40] Zastosowanie systemu ekspertowego, czyli wykorzystanie technik KBE (Knowlegle Based Engineering) w modelowaniu cyfrowym, opisano w podpunkcie 3.6.
[41] Drzewo strukturalne modelu (ang. *feature menager*) bywa również nazywane drzewem konstrukcji lub przeglądarką.
[42] Ewolucję systemów CAx opisano syntetycznie w podpunkcie 2.3.
[43] Inne przykłady to np. CAMWorks (vide tabela 19).
[44] The parameters (parametry), The relations (relacje) i The behavior (zachowanie); szczegółowy opis modułu KWA wykracza

poza zakres podręcznika, więcej informacji na ten temat można znaleźć na stronie producenta oprogramowania CATIA: www.catia.com.pl/tutorial/z2/knowledge_advisor.pdf.
[45] O parametryzacji więcej w podpunkcie 4.2.
[46] Z zastosowaniem złożonych metodologii (CommonKADS, MOKA, MKAD) i dodatkowych komputerowych narzędzi wspomagających z zakresu modelowania wiedzy (zawierających fazy pozyskiwania, formalizacji i implementacji wiedzy).
[47] 30. PN-EN ISO 10209-2:2001 Dokumentacja techniczna wyrobu. Terminologia. Część 2: Terminy dotyczące metod rzutowania.
[48] O parametryzacji napisano szerzej w kolejnym podpunkcie.
[49] Na przykład w programie Autodesk Inventor tego rodzaju wymiary wyświetlane są w nawiasach i nazywane są wymiarami sterowanymi, a w SolidWorks – wymiarami orientacyjnymi.
[50] Może to być program zewnętrzny, np. MS Excel, Notatnik Windows lub wewnętrzny edytor programu CAD.
[51] CAx = CAD/CAM/CAE.
[52] Na uwagę zasługują programy darmowe, których listę można znaleźć np. w serwisie internetowym www.cadazz.com/free-cad-software.htm.
[53] Sposoby integracji CAD i CAM opisano w podpunkcie 6.6.
* WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) – wycinanie elektroerozyjne.
[54] MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) – branże: mechaniczna, elektryczna i instalacyjna.
[55] Nakładka do projektowania mebli opracowana w Katedrze Meblarstwa Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu przez prof. Smardzewskiego i dr. Gawrońskiego (więcej informacji: www.up.poznan.pl/wtd/strony/1/i/7542.php oraz w monografii [Smardzewski 2007]).
[56] System Informacji Geograficznej (GIS, Geographic Information System) – system informacyjny służący do wprowadzania, gromadzenia, przetwarzania oraz wizualizacji danych geograficznych.

[57] Problematyka wymiany danych pomiędzy systemami CAD została szerzej opisana w rozdziale 6.
[58] www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/open/parasolid/index.shtml.
[59] www.ugsplm.de/produkte/nx/unigraphics/obd/parasolid_modeling.shtml.
[60] Spis wybranych formatów plików wraz z ich krótką charakterystyką znajduje się w rozdziale 9.
[61] Podstawowe prymitywy opisano na rysunkach 30 oraz 31.
[62] Jedynym wyjątkiem są proste części składające się wyłącznie z prymitywów.
[63] Zalecana dokładność geometryczna ustalana w trakcie konwersji do neutralnego formatu wymiany danych STEP została podana w tabeli na stronie 109.
[64] Przemysłowe systemy automatyzacji i integracji – Zapis i wymiana informacji o produkcie (tłumaczenie M.S.).
[65] Źródło: DXF Reference, http://usa.autodesk.com, dostęp 19.05.2008.
[66] Bryły CGS występują jedynie w postaci zakodowanej, czyniąc format DXF tylko częściowo otwartym, co skutkuje ograniczonym dostępem i ograniczoną możliwością zapisywania w tym formacie przez programy innych producentów.
[67] Bloki dynamiczne – bloki zawierające warianty obiektów różniące się wymiarami. Biblioteki bloków dynamicznych są mniejsze od analogicznych bibliotek bloków „statycznych". Takie rozwiązanie ułatwia zarządzanie i aktualizowanie tego typu obiektów.
[68] Bardzo często w specyfikacjach przetargowych publikowanych przez prywatne firmy (a nawet przez jednostki rządowe i samorządowe) pojawia się zalecenie dostarczenia dokumentacji projektowej w formacie DWG.
[69] W 2006 roku Autodesk pozwał ODA za użycie słowa Autodesk w formacie DWGdirect. Od roku 2007 (od wersji AutoCAD 2008) podczas próby otwarcia pliku DWGdirect w programie AutoCAD pojawia się ostrzeżenie. Najnowsza specyfikacja pliku DWGdirect

ma oznaczenie Version 4 i jest opisana w dokumencie „OpenDWG R13/R14/R2000/R2004/R2007 File Format Specification” dostępnym na stronie www.openDWG.org (19.05.2008).

[70] Punkt zerowy przedmiotu obrabianego jest ustalany względem punktu zerowego obrabiarki przez programistę lub przez operatora obrabiarki (wpis danych do rejestrów zespołu sterowania lub do programu) – punkt zgodny z bazą wymiarową przedmiotu.

[71] Punkt zerowy obrabiarki – początek układu współrzędnych ustalony przez producenta obrabiarki (może się znajdować poza przestrzenią roboczą).

[72] Punkt odniesienia narzędzia najczęściej wyznaczony jest na powierzchni uchwytu narzędziowego lub jako punkt charakterystyczny narzędzia zerowego (ustawiaka). Stosowane w obróbce narzędzia mają różne wymiary i różną geometrię. Dlatego układ sterowania dysponuje zbiorem rejestrów (korektorów), w których zapisywane są wymiary korekcyjne używanych narzędzi.

[73] MES nie jest jedyną metodą stosowaną do obliczeń inżynierskich wspomaganych komputerowo. Oprócz MES zastosowanie w tej dziedzinie znajdują następujące numeryczne metody obliczeniowe: metoda elementów brzegowych (MEB), metoda różnic skończonych oraz numeryczna mechanika płynów (CFD – od ang. *Computational Fluid Dynamics* – w zastosowaniach do przepływów gazów i cieczy).

[74] Równanie różniczkowe cząstkowe (ang. *partial differential equations*, *PDE*) to równanie, w którym występuje niewiadoma funkcja dwóch lub więcej zmiennych oraz niektóre z jej pochodnych cząstkowych.

[75] Kirsch „Modellierung eines 3D-Kontinuums mit Quadern und Stabelementen” 1868.

[76] M.J. Turner, Ray W. Clough, H.C. Martin, L.J. Topp „Stiffness and deflection analysis of complex structures” 1956.

[77] O.C. Zienkiewicz, Y.K. Cheung „The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics”, Mc Graw-Hill Publishing Company Limited 1967.

[78] Stopniem swobody może być: przemieszczenie (translacja, rotacja), ciśnienie, temperatura, potencjał magnetyczny i napięcie elektryczne. W prezentowanym przypadku zaistniały 141 292 stopnie swobody (po kilka w każdym węźle), węzły uległy przemieszczeniu w różnych kierunkach.

[79] Szadery (ang. *shaders*) doskonale nadają się do symulowania wszelkiego rodzaju powierzchni naturalnych, np. drewna lub marmuru. Istnieją oczywiście szadery wysoko zaawansowane – do symulacji włosów, łuski itd. Czasami nazywa się je hipertekstu rami (ang. *hypertextures*) i zniekształceniami powierzchni (ang. *surface displacement*).